ปูนในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก

นวลลักษณ์ วัสสันตชาติ
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่พบในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก เปรียบเทียบกับปูนสมัยใหม่ที่กรมศิลปากรกำหนดให้ใช้ในการบูรณะโบราณสถานของนครแห่งนี้ภายหลังมหาอุทกภัย พ.ศ.2554 และปูนที่เคยใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา เพื่อนำไปสู่ข้อสรุปคุณสมบัติของปูนโบราณและปูนในปัจจุบัน และนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานคุณสมบัติของปูนที่ควรใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาต่อไป

ผลการศึกษาแสดงว่า ปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานของอยุธยาประกอบไปด้วยปูนขาวและทรายเป็นหลัก แต่อัตราส่วนระหว่างปูนขาวต่อทราย รวมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเชิงกลอื่นๆ มีความแตกต่างกันไปในโบราณสถานแต่ละแหล่ง และไม่สามารถแบ่งเป็นยุคสมัยได้เหมือนกับการแบ่งยุคทางศิลปกรรมหรือสถาปัตยกรรม ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่เหมาะสมให้เป็นมาตรฐานเพื่อใช้อนุรักษ์ปูนในโบราณสถานของอยุธยาได้ทุกยุคหรือทุกแหล่ง แต่ต้องศึกษาคุณสมบัติของอิฐและปูนโบราณในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาทีละแหล่งแล้วจึงนำมากำหนดคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่เหมาะสมในการอนุรักษ์โบราณสถานแหล่งนั้นๆ ต่อไป

คำสำคัญ: มรดกโลก | ปูนโบราณ | ปูนอยุธยา | การอนุรักษ์ปูนในโบราณสถาน | คุณสมบัติของปูน

The Properties of Historic Mortar and Plaster in the Historic City of Ayutthaya World Heritage Site

Nuanlak Watsantachad
Faculty of Architecture, Silpakorn University

Abstract

This research aims to characterize historic mortar and plaster found on ancient monuments of the Historic City of Ayutthaya World Heritage Site compared with the characteristics of modern materials specified by the Fine Art Dapartment for restoring the momuments sufferring from the 2014 Great Flood and in the past with the assumption that the properties of the studied historic mortar and plaster could lead to a standardization of the properties of modern mortar and plaster appropriate for the restoration of the monuments in this world heritage site. However, the research results show that, except being mainly composed of lime and sand, the other properties of the historic mortar and plaster vary from monument to monument regardless of the periods or styles of art and architecture. Hence, there is no starndard modern mortar and plaster that could be used in every Ayutthaya's restoration project. Studying the properties of each monument's materials prior to considering appropriate modern materials to be used for restoring them is therefore mandatory.

Key Words: World Heritage | Historic mortar and plaster | Ayutthaya lime | Mortar and plaster conservation | Lime properties

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กรุงศรีอยุธยาเป็นราชธานีแห่งที่ 2 ของราชอาณาจักรไทยที่มีความเจริญรุ่งเรืองยาวนานถึง 417 ปี ก่อนที่จะเสียกรุงครั้งที่ 2 ให้แก่พม่าในปี พ.ศ. 2310 ซึ่งภายหลังจากกรุงศรีอยุธยาแตก ก็ได้ถูกทิ้งร้างจนมาถึง พ.ศ. 2478 กรมศิลปากรจึงได้เริ่มเข้าไปฟื้นฟูและอนุรักษ์เมืองพระนครศรีอยุธยา โดยเริ่มจากการขึ้นทะเบียนโบราณสถานในพระนครศรีอยุธยา และในปี พ.ศ. 2525 ก็ได้พัฒนาพื้นที่โบราณสถานส่วนหนึ่งในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา (1,810 ไร่) ให้เป็นอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา (FAD, 1990) และได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นแหล่งมรดกโลกประเภทวัฒนธรรมจากองค์การยูเนสโกตั้งแต่ พ.ศ. 2534 (UNESCO, n.d.) โดยมีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า “นครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา (Historic City of Ayutthaya)” แหล่งมรดกโลก (World Heritage Site)

ในปีพ.ศ.2554 ประเทศไทยประสบมหาอุทกภัย ซึ่งนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาก็เป็นหนึ่งในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยครั้งนี้อย่างรุนแรง ภายหลังจากสถานการณ์น้ำลดลงแล้ว กรมศิลปากรได้ลงพื้นที่ร่วมกับคณะผู้เชี่ยวชาญจากองค์การศึกษาวิทยาศาสตร์และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ หรือองค์การยูเนสโก (UNESCO) เพื่อร่วมกันหาแนวทางฟื้นฟูบูรณะโบราณสถานที่เสียหายจากอุทกภัย โดยในภายหลังได้มีมติจากคณะกรรมการมรดกโลก พ.ศ.2558 ให้ประเทศไทยเร่งพัฒนาทักษะความรู้ของช่างฝีมือที่ทำงานอนุรักษ์โบราณสถานในแหล่งมรดกโลกพระนครศรีอยุธยา โดยอยู่บนพื้นฐานของความถูกต้องทางวิทยาศาสตร์และการเคารพภูมิปัญญา วิธีการ และวัสดุดั้งเดิม (WHC, 2015: 116-117) ประกอบกับรายงานของผู้เชี่ยวชาญจากสภาการโบราณสถานระหว่างประเทศ หรืออิโคโมส (ICOMOS) พ.ศ.2557 ที่กล่าวถึงปัญหาหนึ่งในการอนุรักษ์โบราณสถานพระนครศรีอยุธยาที่ผู้เชี่ยวชาญตรวจพบ คือการขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญในการใช้วัสดุดั้งเดิมเช่นปูนขาวหมักแบบโบราณ แต่มีการใช้วัสดุใหม่เช่นปูนซีเมนต์ขาวในการบูรณะโบราณสถาน (ซึ่งอาจมีการนำมาผสมใช้ร่วมกับปูนขาว) ดังนั้นผู้เชี่ยวชาญจากอิโคโมสจึงแนะนำให้หยุดการใช้ปูนซีเมนต์ในปูนสอ และให้มีการทดสอบทางวิทยาศาสตร์กับปูนสอดั้งเดิม (original mortar) และปูนสอผสมใหม่ (new mortar) เพื่อให้ได้อัตราส่วนของส่วนผสมที่ต้องการอย่างแท้จริง รวมทั้งให้มีการวิเคราะห์ปูนสอที่ทำจากปูนขาวหมักแบบโบราณในห้องทดสอบด้วย (ICOMOS, 2014: 6-10)

จากการทบทวนเอกสารในเบื้องต้นพบว่า ปัญหาในงานบูรณะโบราณสถานของกรมศิลปากรที่สำคัญคือการนำปูนซีเมนต์ขาวล้วนหรือผสมปูนขาวมาใช้เป็นปูนสอหรือปูนฉาบ ในขณะที่ยังคงใช้ปูนขาวหมักตำแบบโบราณในการบูรณะปูนปั้นมาอย่างต่อเนื่อง (FAD, 2012a: 6) ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุดั้งเดิมเพื่อการอนุรักษ์แหล่งมรดกโลกพระนครศรีอยุธยาในระยะแรก จึงเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบดั้งเดิมของอยุธยา เพื่อนำคุณสมบัติดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับปูนขาวหมักแบบโบราณและปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ที่ถูกนำมาใช้เป็นปูนสอและปูนฉาบในการบูรณะโบราณสถานในแหล่งมรดกโลกพระนครศรีอยุธยาตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน

จากข้อสรุปของที่มาและปัญหาที่ปรากฏ องค์การยูเนสโกจึงมอบหมายให้ผู้วิจัยในฐานะที่ปรึกษาด้านการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุดั้งเดิมในแหล่งมรดกโลกพระนครศรีอยุธยา ดำเนินการศึกษาคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่พบในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา เปรียบเทียบกับปูนสมัยใหม่ที่กรมศิลปากรกำหนดให้ใช้ในการบูรณะโบราณสถานของนครแห่งนี้ภายหลังมหาอุทกภัย พ.ศ. 2554 และที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมาเพื่อนำไปสู่ข้อสรุปคุณสมบัติของปูนโบราณและปูนในปัจจุบัน และนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานคุณสมบัติของปูนที่ควรใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของนครประวัติศาตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลกต่อ

ไป

2. โบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาและการอนุรักษ์ที่ผ่านมา

จากคำนิยามของกรมศิลปากรโดยจำแนกตามประเภทของโบราณสถาน นครประวัติศาสตร์ได้แก่เมืองหรือบริวารของเมืองที่มีแบบอย่างวัฒนธรรม ชีวิตความเป็นอยู่ สภาพของอาคาร สถานที่ หรือมีอาคารประเภทอนุสาวรีย์แห่งชาติ อาคารสถาปัตยกรรมแห่งชาติ อาคารสัญลักษณ์ของเมือง ย่านประวัติศาสตร์ และอุทยานประวัติศาสตร์ (ศิลปากร, 2533: 7) ในขณะที่นครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา (Historic City of Ayutthaya) คือนครที่คณะกรรมการมรดกโลก องค์การยูเนสโก มีมติให้ขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก เมื่อ พ.ศ. 2534 โดยที่แหล่งมรดกโลกดังกล่าวประกอบไปด้วย อุทยานประวัติศาสตร์ วัด ซากโบราณสถาน และสถานที่สำคัญโดยรอบที่เกี่ยวข้องกับนครประวัติศาสตร์แห่งนี้[1] ถึงแม้ว่าในภายหลังกรมศิลปากรจะกำหนดพื้นที่มรดกโลกไว้เพียงแค่อุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา (Pinyovanichaka, 1994: 38-41) แต่ถ้าพิจารณาจากคุณสมบัติที่เป็นไปตามเกณฑ์การพิจารณาการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกแล้ว การเลือกตำแหน่งที่ตั้งของเมืองในชัยภูมิที่เป็นเกาะ และภูมิปัญญาอันชาญฉลาดในการวางผังเมืองบนเกาะเมืองให้เป็นระบบตารางของคลอง คูเมือง และถนนเพื่อการระบายน้ำที่ดีตามธรรมชาติ รวมไปถึงศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมที่มีความงามและวิทยาการอันเป็นเอกลักษณ์ที่มีอยู่ทั้งบนเกาะเมืองและบริเวณโดยรอบ เป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่มีคุณค่าอย่างสากล (outstanding universal values หรือ OUV) ตามเกณฑ์ของคณะกรรมการมรดกโลก จนทำให้ได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก (UNESCO, n.d.; Pinyovanichaka, 1994: 38-41) ซึ่งในอนาคตกรมศิลปากรอาจดำเนินการขยายขอบเขตของมรดกโลกให้รวมไปถึงเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยาทั้งเกาะ เพื่อให้โบราณสถานที่อยู่รายรอบและในเกาะเมืองได้รับการปกป้องดูแล และทำให้เกิดบูรณภาพของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก อย่างแท้จริงก็เป็นได้

ศิลปะอยุธยาหมายถึงงานศิลปกรรมรวมถึงสถาปัตยกรรมที่สร้างขึ้นโดยชุมชนที่มีอำนาจในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาในช่วงตั้งแต่พุทธศตวรรษที่ 19-24 (Dumrongrajanupab, 1975: 160-172) ซึ่งสามารถเชื่อมโยงกับประวัติศาสตร์ของอาณาจักรกรุงศรีอยุธยาตั้งแต่ พ.ศ.1893 ถึง พ.ศ.2310 (Leksukhum, 2007: 31-32) ศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านความชาญฉลาดและความสร้างสรรค์ของคนโบราณแห่งกรุงศรีอยุธยา รวมทั้งยังแสดงถึงคุณภาพของงานช่าง อัจฉริยภาพทางด้านวิธีการก่อสร้าง และความเชี่ยวชาญของช่างก่อสร้าง ซึ่งเป็นคุณค่า บูรณภาพ และความเป็นของแท้ของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาที่ควรอนุรักษ์ไว้ (UNESCO, n.d.) ซึ่งจากการศึกษาประวัติศาสตร์และโบราณคดีของพระนครศรีอยุธยาพบว่ามีการแบ่งยุคสมัยของกรุงศรีอยุธยาเป็น 3 สมัย คืออยุธยาตอนต้น (พุทธศตวรรษที่ 19-20) อยุธยาตอนกลาง (พุทธศตวรรษที่ 21-22) และอยุธยาตอนปลาย (พุทธศตวรรษที่ 23-24) (Saisingha, 2015: 696) ซึ่งศิลปะและสถาปัตยกรรมในแต่ละสมัยนั้นได้รับอิทธิพลหรือมีความสัมพันธ์ทางการเมืองหรือศาสนากับอาณาจักรและเมืองต่างๆ และแสดงออกมาเป็นรูปแบบของศิลปะและสถาปัตยกรรมที่ต่างกัน เช่น ในสมัยอยุธยา

[1] คณะกรรมการมรดกโลก องค์การยูเนสโก แห่งสหประชาชาติ มีมติให้นครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาเป็นมรดกโลกในการประชุมสมัยที่ 15 ซึ่งจัดขึ้นที่กรุงคาร์เทจ ประเทศตูนีเซีย ระหว่างวันที่ 9 – 13 ธันวาคม พ.ศ.2534

ตอนต้นนิยมสร้างสถาปัตยกรรมแบบปรางค์ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับปรางค์หรือปราสาทของอาณาจักรเขมร ในขณะที่ในสมัยอยุธยาตอนกลางมีความนิยมสร้างเจดีย์ทรงระฆัง (Ditsakun, 1996: 35) และในสมัยอยุธยาตอนปลายพระเจ้าปราสาททองมีการฟื้นฟูการสร้างปรางค์แบบเขมรขึ้นอีกครั้ง ต่อมาในสมัยสมเด็จพระนารายณ์ก็มีวิทยาการการก่อสร้างจากชาติตะวันตกเข้ามา และในรัชสมัยของราชวงศ์บ้านพลูหลวง งานศิลปะและสถาปัตยกรรมจะเน้นไปที่การบูรณะปฏิสังขรณ์และต่อเติมวัดที่มีมาแต่โบราณ (SU, 2012: 91) เป็นต้น

สถาปัตยกรรมส่วนใหญ่โดยเฉพาะศาสนสถานและปราสาทราชวังของกรุงศรีอยุธยา ได้ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการก่อสร้างแบบก่ออิฐฉาบปูน โดยวัสดุที่ใช้สออิฐนั้นพบทั้งที่เป็นดินดิบและปูน ซึ่งภายในเจดีย์ขนาดใหญ่ส่วนมากจะสอด้วยดินดิบ ในขณะที่ภายนอกจะสอด้วยปูน (Khemnak, 2017: 36, 45) โดยปูนที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารมาตั้งแต่ดั้งเดิมคือปูนขาวหมักที่ได้จากการนำปูนดิบ (ซึ่งอาจจะมาจากการเผาหินปูนหรือเปลือกหอย) มาแช่ในน้ำ โดยพบหลักฐานเป็นบ่อผสมปูนขาวและเตาเผาปูนขาวในบริเวณโบราณสถาน เช่น ที่วัดพุทไธศวรรย์ (ibid.: 8) แล้วนำปูนที่ได้จากการหมักมาผสมกับทรายและ/หรือส่วนผสมอื่นๆ เช่น เม็ดหินปูน เศษอิฐ หรือเศษกระเบื้องเคลือบก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งจากการสำรวจปูนสอที่ผนังด้านในซุ้มประตูกำแพงวัดราชบูรณะของอาจารย์พเยาว์ เข็มนาค ก็พบว่ามีเม็ดหินปูนขนาด 1-4 มิลลิเมตร เศษอิฐ และเศษเครื่องเคลือบบดละเอียดปะปนอยู่ในปูนสอด้วย (ibid.: 26, 28)

เมื่อปี พ.ศ.2478 กรมศิลปากรได้เริ่มฟื้นฟูและอนุรักษ์เมืองพระนครศรีอยุธยาโดยเริ่มจากการขึ้นทะเบียนโบราณสถานในพระนครศรีอยุธยา และในปีพ.ศ.2525 ก็ได้พัฒนาพื้นที่โบราณสถานส่วนหนึ่งในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา (1,810 ไร่) ให้เป็นอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา (FAD, 1990) ข้อมูลจากเอกสารของกรมศิลปากรระบุว่ามีโบราณสถานทั้งหมด 95 แห่งในอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา และมีอีกประมาณ 100 แห่งในพื้นที่ที่เหลือบนเกาะเมือง (ibid.) ซึ่งถ้านับรวมกับโบราณสถานนอกเกาะเมืองด้วยอาจมีถึงเกือบ 500 แห่ง (Khemnak, 2017: 9) ซึ่งในช่วงแรกนั้นงานอนุรักษ์โบราณสถานในพระนครศรีอยุธยาได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการบูรณะ แต่ในเวลาต่อมาได้ปรากฏหลักฐานของความเสียหายอันเนื่องมาจากการใช้ปูนซีเมนต์ ทำให้ในปัจจุบันกรมศิลปากรได้เปลี่ยนมากำหนดให้ใช้ปูนขาวหมักแบบโบราณและปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขาวในการบูรณะโบราณสถานพระนครศรีอยุธยาแทน (FAD, 2012a: 6) จากการทบทวนเอกสารรายการประกอบแบบในโครงการฟื้นฟูโบราณสถานหรือโครงการบูรณะโบราณสถานอันเนื่องมาจากอุทกภัย พ.ศ. 2554 ที่ได้แนบไว้พร้อมกับสัญญาจ้างงานที่กรมศิลปากรทำไว้กับบริษัทผู้รับจ้างงานอนุรักษ์แหล่งโบราณสถานจำนวน 17 แห่ง พบว่ามีการระบุอย่างชัดเจนให้ผู้รับจ้างใช้ปูนแบบโบราณ (ปูนดิบ-ปูนหมัก) รวมถึงกำหนดที่มาของปูนดิบและกรรมวิธีในการหมักปูน แต่ในการผสมปูนสอนั้นได้ระบุให้ใช้ปูนซีเมนต์ขาวร่วมด้วย โดยให้ผสมกับปูนหมักและทรายกลางหรือทรายหยาบในอัตราส่วน 1:8:24 (ปูนซีเมนต์ขาว:ปูนขาวหมัก:ทราย) (FAD, 2012a: 6) และในงานบูรณะโบราณสถานบางแห่ง เช่นที่วัดบรมพุทธาราม ก็ได้มีการระบุส่วนผสมของปูนก่อแยกออกจากปูนสอด้วย[2] โดยกำหนดให้ผสมปูนขาวและทรายกลางในอัตราส่วน 1:2 (ปูนขาว:ทราย) แช่หมักทิ้งไว้ 48 ชั่วโมงแล้วนำส่วนผสมดังกล่าวไปผสม

[2] จากการสอบถามเจ้าหน้าที่กรมศิลปากร “ปูนก่อ” ในรายการประกอบแบบของกรมศิลปากรหมายถึงปูนที่ใช้ในการก่ออิฐเสริมหรืออิฐใหม่ ในขณะที่ “ปูนสอ” หมายถึงปูนที่ใช้กรอกเสริมในจุดที่ปูนดั้งเดิมหายไป (repoint)

กับปูนซีเมนต์ขาวในอัตราส่วน 1:6 (ปูนซีเมนต์ขาว:ปูนทรายหมัก) (FAD, 2012a: 8) แต่มิได้ระบุอัตราส่วนผสมในปูนที่จะใช้สำหรับฉาบไว้แต่อย่างใด (FAD, 2012a: 4-7) ในขณะที่ในรายการประกอบแบบงานบูรณะโบราณสถานวัดวรเชษฐาราม (นอก) มีการกล่าวถึงการฉาบปูนหมักขัดปูนตำว่าให้เป็นไปตามสูตรที่กำหนด แต่ก็มิได้มีการระบุสูตรที่ชัดเจน (FAD, 2012b: 4-5) ซึ่งจากการสืบค้นรายการประกอบแบบงานบูรณะโบราณสถานอื่น ๆ ของกรมศิลปากรพบว่ามีการระบุอัตราส่วนผสมของปูนฉาบไว้ โดยแบ่งเป็นปูนฉาบชั้นที่ 1 และ 2 ให้ใช้ปูนหมักผสมกับทรายในอัตราส่วน 2:5 (โดยปริมาตร) ในขณะที่ปูนฉาบชั้นที่ 3 และชั้นผิวนอกให้ใช้ในอัตราส่วน 1:3 (ชั้นผิวนอกให้ใช้ปูนตำ) โดยมีการระบุให้ใส่น้ำกาว น้ำอ้อย หรือน้ำตาลตามวิธีการแบบโบราณลงในส่วนผสมได้หากมีความจำเป็น (FAO-3, 2007: 12; Poshyanandana, 2009) อย่างไรก็ตามสูตรปูนฉาบนี้อาจเป็นการกำหนดรายการประกอบแบบบูรณะเฉพาะงาน โดยไม่ได้นำมาใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการกำหนดอัตราส่วนผสมของปูนฉาบที่ใช้ในการบูรณะโบราณสถานในแหล่งมรดกโลกพระนครศรีอยุธยา และเป็นที่น่าสังเกตว่ารายการประกอบงานบูรณะโบราณสถานในปี พ.ศ.2555 นั้น มิได้มีการกล่าวถึงการนำปูนหมักแบบโบราณมาใช้เป็นปูนสอและหรือปูนฉาบโดยไม่ผสมกับปูนซีเมนต์ขาวเลย มีแค่เพียงการระบุให้ใช้ปูนหมักแบบโบราณผสมกับทรายละเอียดในอัตราส่วน 1:1 เป็นน้ำปูนเพื่อใช้อัดฉีดรอยแตกร้าวหรือโพรงต่างๆ ในโครงสร้างเท่านั้น (FAD, 2012a: 6-8) ซึ่งการที่กรมศิลปากรยังคงใช้ปูนซีเมนต์ขาวเป็นส่วนผสมในปูนสอหรือปูนฉาบที่ใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานตลอดมา ทำให้คณะกรรมการมรดกโลกและผู้เชี่ยวชาญจากอิโคโมสท้วงติงให้หยุดใช้และแนะนำให้มีการศึกษาและทดสอบทางวิทยาศาสตร์กับปูนสอดั้งเดิมและปูนสอผสมใหม่ จนกลายมาเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบดั้งเดิมที่พบในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติของปูนที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมาและที่ใช้ในการบูรณะโบราณสถานในปัจจุบัน เพื่อนำคุณสมบัติเหล่านั้นมาวิเคราะห์เปรียบเทียบความเหมือนหรือแตกต่าง และนำไปสู่การสรุปคุณสมบัติมาตรฐานของปูนที่ควรนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาให้เหมาะสมต่อไป

4. คำถามในการวิจัย

คำถามหลักในการวิจัยเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่บรรลุผลตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยข้างต้นคือ ***"คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่จะนำมาใช้ในการบูรณะโบราณสถานในนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก ให้เหมาะสมคืออะไร และสามารถกำหนดให้เป็นคุณสมบัติมาตรฐานของปูนสอและปูนฉาบที่จะนำมาใช้ในการบูรณะโบราณสถานของพระนครศรีอยุธยาได้หรือไม่"*** ซึ่งจากหลักการอนุรักษ์โบราณสถานในระดับสากล วัสดุใหม่ที่จะนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานต้องมีคุณสมบัติที่เข้ากันได้กับคุณสมบัติของวัสดุดั้งเดิม (Venice Charter, 1964) ดังนั้นการจะตอบคำถามในการวิจัยนี้ได้ จึงจำเป็นต้องค้นหาคำตอบของคำถามย่อยดังต่อไปนี้

1) คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบดั้งเดิมที่พบในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาคืออะไร

ทั้งนี้จากการที่ศิลปะและสถาปัตยกรรมของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาได้ถูกแบ่งเป็น 3 สมัย อย่างชัดเจน ทำให้เกิดคำถามเพิ่มขึ้นว่าปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานของแต่ละยุคสมัยนั้นมีคุณสมบัติเหมือนหรือต่างกันหรือไม่ อย่างไร สามารถแบ่งเป็นยุคต่างๆ เช่นเดียวกับการแบ่งยุคสมัยของรูปแบบทางศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมได้หรือไม่

2) ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขาว และปูนขาวหมักแบบโบราณ ที่กรมศิลปากรได้นำมาใช้ในการบูรณะโบราณสถานพระนครศรีอยุธยาในอดีตและปัจจุบันนั้น มีคุณสมบัติแตกต่างจากคุณสมบัติของปูนโบราณดั้งเดิมหรือไม่ อย่างไร และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการบูรณะโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาหรือไม่ เพราะเหตุใด

5. ขอบเขตการวิจัย

จากการสำรวจพื้นที่และการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดขอบเขตทางด้านพื้นที่พบว่า นอกจากการกำหนดพื้นที่โดยกรมศิลปากร นครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาอาจหมายรวมไปถึงพื้นที่รอบเกาะเมือง ซึ่งยังมีหลักฐานของการตั้งถิ่นฐานบ้านเรือน วัดและโบราณสถานสำคัญ รวมทั้งชุมชนที่มีความสัมพันธ์กับประวัติศาสตร์ของกรุงศรีอยุธยามาตั้งแต่โบราณ เช่นวัดพุทไธศวรรย์ ที่ปรากฏตามตำนานว่าสมเด็จพระรามาธิบดีที่ 1 (พระเจ้าอู่ทอง) ทรงสร้างขึ้นในบริเวณที่ซึ่งเป็นที่ตั้งพลับพลาที่ประทับเมื่อทรงอพยพมาตั้งอยู่ก่อนสถาปนากรุงศรีอยุธยาเป็นราชธานี วัดไชยวัฒนาราม ซึ่งพระเจ้าปราสาททองทรงสร้างขึ้นเพื่ออุทิศผลบุญนี้ให้กับพระราชมารดาของพระองค์เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดพื้นที่นครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา โดยขยายให้ครอบคลุมทั้งพื้นที่เกาะเมืองที่มีอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาเป็นส่วนหนึ่ง และพื้นที่ฝั่งตรงข้ามแม่น้ำรอบเกาะเมือง อันประกอบไปด้วยแม่น้ำป่าสัก แม่น้ำลพบุรี และแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งนับจากนี้ไปในงานวิจัยนี้จะเรียกขอบเขตพื้นที่วิจัยให้สั้นลงว่า “อยุธยา”

จากการที่นักวิชาการได้แบ่งยุคสมัยของศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมของอยุธยาเป็น 3 สมัย คือ อยุธยาตอนต้น (พุทธศตวรรษที่ 19-20) อยุธยาตอนกลาง (พุทธศตวรรษที่ 21-22) และอยุธยาตอนปลาย (พุทธศตวรรษที่ 23-24) (SU, 2012: 5-7; Saisingha, 2015: 696) ในงานวิจัยนี้จึงแบ่งขอบเขตการวิจัยในด้านระยะเวลาออกเป็น 3 ยุค อันประกอบไปด้วย 1) โบราณสถานที่สร้างขึ้นในรัชสมัยของพระเจ้าอู่ทองถึงเจ้าสามพระยา เป็นโบราณสถานในสมัยอยุธยาตอนต้น 2) โบราณสถานที่สร้างขึ้นในรัชสมัยของพระบรมไตรโลกนาถถึงพระเจ้าทรงธรรม เป็นโบราณสถานในสมัยอยุธยาตอนกลาง และ 3) โบราณสถานที่สร้างขึ้นในรัชสมัยของพระเจ้าปราสาททองถึงพระเจ้าเอกทัศน์ เป็นโบราณสถานในสมัยอยุธยาตอนปลาย

ส่วนขอบเขตในด้านเนื้อหา การวิจัยนี้จะเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบโบราณที่อยู่บนโบราณสถานของอยุธยา และปูนสูตรต่างๆ ที่กรมศิลปากรใช้ในการบูรณะ โดยสามารถสรุปหมวดของปูนที่ศึกษาได้ดังนี้

หมวดปูนโบราณที่พบในโบราณสถานอยุธยา (Historic Ayutthaya Lime) โดยกำหนดรหัสเป็น HAL

1. ปูนสอ (mortar) โบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนต้น (The Early Ayutthaya Period) รหัสคือ HAL/E-m โดยกำหนดให้ m เป็นรหัสของปูนสอ

2. ปูนสอโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนกลาง (The Middle Ayutthaya Period) รหัสคือ HAL/M-m

3. ปูนสอโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนปลาย (The Late Ayutthaya Period) รหัสคือ (HAL/L-m)

4. ปูนฉาบ (plaster) โบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนต้น (HAL/E-p) โดย p เป็นรหัสของปูนฉาบ

5. ปูนฉาบโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนกลาง รหัสคือ HAL/M-p

6. ปูนฉาบโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนปลาย รหัสคือ HAL/L-p

หมวดปูนสมัยใหม่ กำหนดรหัสเป็น MLC (Mixed Lime Cement) แบ่งเป็น

1. ปูนสอหล่อขึ้นใหม่ที่ทำมาจากปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขาว ผสมตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ขาว:ปูนขาวหมัก:ทราย= 1/8:1:3[3] หรือ 1:8:24 ตามที่ระบุในรายการประกอบแบบของกรมศิลปากร (Fine Art Department) กำหนดรหัสเป็น NMLC/FA-m (New Mixed Lime Cement/Fine Art Department Formula)

2. ปูนสอหล่อขึ้นใหม่ที่ทำมาจากปูนขาวหมัก ผสมตามอัตราส่วนมาตรฐานทั่วไป รวมทั้งเป็นอัตราส่วนผสมปูนที่กรมศิลปากรกำหนดให้ใช้ในการบูรณะโบราณสถาน โดยมีปูนขาวหมัก:ทราย= 1:3[4] กำหนดรหัสเป็น NL/FA-m (New Lime/Fine Art Department Formula)

3. ปูนสอที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของอยุธยาที่ผ่านมา กำหนดรหัสเป็น MLC/U-m

4. ปูนฉาบที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของอยุธยาที่ผ่านมา กำหนดรหัสเป็น MLC/U-p

6. กระบวนการวิจัย

ในการวิจัยนี้ เมื่อทราบที่มาและความสำคัญของปัญหาและศึกษาทบทวนข้อมูลในเบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนแรกในการวิจัยคือการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อนำไปสู่การตั้งคำถามนำวิจัย และนำไปสู่การกำหนดวัตถุประสงค์ของการวิจัยและขอบเขตการศึกษา รวมทั้งกำหนดประเด็นเพื่อทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจึงคัดเลือกกรณีศึกษาเพื่อเก็บตัวอย่างปูนตามที่กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษา แล้วนำมาดำเนินการทดสอบคุณสมบัติและวิเคราะห์ผลการทดสอบ เพื่อสรุปและตอบคำถามวิจัยให้สมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยนำกระบวนการวิจัยของงานวิจัยนี้มาสังเคราะห์เป็นแผนภาพได้ดังแผนภาพในหน้าถัดไป (ดูแผนภาพที่ 1)

[3] จากการสัมภาษณ์อาจารย์จิราภรณ์ อรัณยะนาค เมื่อวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ.2559 ณ บริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด อาจารย์จิราภรณ์เป็นผู้ให้อัตราส่วนผสมปูนนี้ไว้แก่วิศวกรท่านหนึ่งของกรมศิลปากร เพื่อใช้ในการบูรณะปราสาทเมืองต่ำ จังหวัดบุรีรัมย์ ก่อนที่กรมศิลปากรจะนำไปประยุกต์เป็นอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ขาว:ปูนขาวหมัก:ทราย = 1:8:24 (Aranyanark, 2016) และระบุในรายการประกอบแบบ เพื่อให้ผู้รับเหมางานบูรณะโบราณสถานพระนครศรีอยุธยาใช้เป็นอัตราส่วนมาตรฐานในการผสมปูนเพื่อใช้ยาแนวหรืออุดปูนสอเดิมที่เสื่อมสภาพ หรือที่ในรายการประกอบแบบระบุว่าเป็น “ปูนสอ” (Repointing MLC—ผู้วิจัย) (FAD, 2012a: 6-8.)

[4] อัตราส่วนผสมของปูนเพื่อใช้ในการก่อนี้เป็นอัตราส่วนมาตรฐานที่กรมศิลปากรใช้เป็นปูนสอในงานบูรณะโบราณสถาน

แผนภาพที่ 1: กระบวนการวิจัย (Research Process)

ขั้นตอน	ผลการดำเนินงาน
อธิบายที่มาและความสำคัญของปัญหา	1. มีการใช้ปูนซีเมนต์ในการบูรณะโบราณสถานในนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก 2. การใช้ปูนซีเมนต์ในการบูรณะโบราณสถานเป็นสิ่งไม่เหมาะสม 3. ควรมีการวิเคราะห์คุณสมบัติของปูนโบราณเพื่อให้ได้คุณสมบัติมาตรฐานที่จะนำไปกำหนดคุณสมบัติของปูนที่จะนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก
ค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้น	1. ปูนดั้งเดิมที่ใช้ในโบราณสถานของอยุธยาทำมาจากปูนขาวหมัก 2. การบูรณะโบราณสถานของอยุธยาที่ผ่านมามีการใช้ปูนซีเมนต์ล้วนหรือนำมาผสมกับปูนขาวเพื่อใช้เป็นปูนก่อและปูนฉาบในการบูรณะ แต่ยังคงใช้ปูนขาวเป็นส่วนผสมหลักของปูนในการบูรณะงานปูนปั้น 3. สถาปัตยกรรมของอยุธยาแบ่งได้เป็น 3 ยุคได้อย่างชัดเจน คือสถาปัตยกรรมยุคอยุธยาตอนต้น ตอนกลาง และตอนปลาย

ตั้งคำถามวิจัย	คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก คืออะไร
ตั้งคำถามวิจัยย่อย	1. คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบโบราณในโบราณสถานของอยุธยาในแต่ละยุคสมัยเป็นอย่างไร เหมือนหรือแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร 2. คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่ทำมาจากปูนขาวหมัก ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขาว และปูนที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของอยุธยาที่ผ่านมา มีคุณสมบัติเป็นอย่างไร และมีความเหมือนหรือแตกต่างจากคุณสมบัติของปูนสอหรือปูนฉาบโบราณหรือไม่ อย่างไร

กำหนดวัตถุประสงค์ของการวิจัย	1. ศึกษาคุณสมบัติของปูนในโบราณสถานของอยุธยา ทั้งยุคอยุธยาตอนต้น ตอนกลาง และตอนปลาย และปูนที่กรมศิลปากรเคยใช้อนุรักษ์โบราณสถานของอยุธยาในอดีตที่ผ่านมาและที่ใช้ในปัจจุบัน 2. วิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติของปูนที่ศึกษาในข้อ 1 3. สรุปคุณสมบัติมาตรฐานของปูนที่ควรนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก

กำหนดขอบเขตการวิจัย	ด้านพื้นที่วิจัย	นครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา ทั้งในเกาะเมืองอยุธยาและพื้นที่ฝั่งตรงข้ามแม่น้ำรอบเกาะเมือง
	ด้านระยะเวลา	อยุธยาตอนต้น (รัชสมัยพระเจ้าอู่ทอง-เจ้าสามพระยา) อยุธยาตอนกลาง (รัชสมัยพระบรมไตรโลกนาถ-พระเจ้าทรงธรรม) อยุธยาตอนปลาย (รัชสมัยพระเจ้าปราสาททอง-พระเจ้าเอกทัศน์)

	ด้านเนื้อหา	- ศึกษาคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานของอยุธยาทั้ง 3 ยุค
		- ศึกษาคุณสมบัติของปูนสมัยใหม่ ประกอบด้วย
		  - ปูนสอสูตร 1:8:24 (ปูนซีเมนต์ขาว:ปูนขาว:ทราย) ของกรมศิลปากร
		  - ปูนสอสูตร 1:3 (ปูนขาว:ทราย)
		  - ปูนสอที่ใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของอยุธยาในอดีต
		  - ปูนฉาบที่ใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของอยุธยาในอดีต

กำหนดประเด็นที่ต้องศึกษาทบทวนในดำเนินการวิจัย	1. ปูนขาว-ปูนซีเมนต์ขาว 2. คุณสมบัติของวัสดุที่ต้องศึกษา 3. หลักการอนุรักษ์โบราณสถานที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์วัสดุ

แผนภาพที่ 1: กระบวนการวิจัย (Research Process) (ต่อ)

<table>
<tr><th colspan="3">ดำเนินการวิจัย</th></tr>
<tr><td>วัตถุประสงค์</td><td colspan="2">วิธีการ/เนื้อหา</td></tr>
<tr><td rowspan="4">1. ศึกษาคุณสมบัติของปูน</td><td>ทบทวนเอกสาร</td><td>- คุณสมบัติของวัสดุที่ต้องศึกษา
- ปูนขาว-ปูนซีเมนต์ขาว</td></tr>
<tr><td>เลือกกรณีศึกษา</td><td>- สำรวจ
- ประชุมร่วมกับกรมศิลปากรและผู้ทรงคุณวุฒิ
- ตั้งเกณฑ์ในการเลือก</td></tr>
<tr><td>เก็บและเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติ</td><td>- ปูนดั้งเดิมในโบราณสถาน
- ปูนที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา
- ปูนที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์ในปัจจุบัน</td></tr>
<tr><td>ทดสอบคุณสมบัติ</td></tr>
<tr><td>2. วิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติของปูนที่ศึกษา</td><td colspan="2">นำผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของปูนแต่ละกลุ่มมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3. อภิปรายและสรุปคุณสมบัติมาตรฐานของปูนที่ควรนำมาใช้ในการอนุรักษ์</td><td>ทบทวนเอกสาร</td><td>- หลักการอนุรักษ์โบราณสถานที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์วัสดุ
- คุณสมบัติของปูนที่ควรใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถาน</td></tr>
<tr><td colspan="2">อภิปรายผลการทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติของปูนที่ศึกษากับหลักการอนุรักษ์โบราณสถานและคุณสมบัติของปูนที่ควรใช้ในการอนุรักษ์</td></tr>
<tr><td colspan="2">สรุปคุณสมบัติมาตรฐานของปูนที่ควรใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของอยุธยา</td></tr>
<tr><td rowspan="3">4. สรุปผลการวิจัย</td><td colspan="2">นำผลการศึกษามาตอบคำถามการวิจัย</td></tr>
<tr><td colspan="2">สรุปผลการวิจัย</td></tr>
<tr><td colspan="2">นำเสนอข้อเสนอแนะ (ถ้ามี)</td></tr>
</table>

6. ปูนสอ-ปูนฉาบ

ปูนสอหรือปูนก่อ (mortar) หมายถึงวัสดุที่ใช้เชื่อมติดในงานก่ออิฐถือปูน (Bucher, 1996: 296 อ้างถึงใน Wongsawan, 2002: 11) เป็นวัสดุประสาน (binder หรือ cementing material) ที่ทำหน้าที่เชื่อมก้อนอิฐหรือหินให้ติดกันในการก่อสร้างกำแพง ผนัง พื้น หรือหลังคา ส่วนปูนฉาบ (plaster) คือวัสดุที่ใช้ฉาบหน้ากำแพงหรือสิ่งก่อสร้างอิฐหรือหิน เพื่อเป็นชั้นปกป้องอิฐหรือหินไม่ให้สัมผัสกับสภาพแวดล้อมและตัวการต่างๆ เช่นน้ำหรือความชื้น ที่ทำให้อิฐหรือหินเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และในขณะเดียวกันก็อาจเป็นการทำเพื่อความเรียบร้อยสวยงามของพื้นผิว หรือเพื่อเตรียมพื้นผิวสำหรับงานประดับตกแต่งในขั้นต่อไป

ส่วนผสมหลักของปูนสอหรือปูนฉาบคือปูนและมวลรวม โดยปูนทำหน้าที่รวมและห่อหุ้มประสานวัสดุมวลรวมและ/หรือส่วนผสมอื่นๆ ให้แข็งตัวเป็นก้อน และทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของเนื้อปูน (Nim-ngarm, 2007: 42) ในขณะที่มวลรวม (aggregate) หมายถึงวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมในปูน ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบหลักของส่วนผสมปูนที่ใช้ในงานก่อหรือฉาบ ซึ่งโดยทั่วไปก็คือเม็ดทราย แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือมวลรวมหยาบซึ่งมีขนาดของเม็ดตั้งแต่ 4.75 มิลลิเมตรขึ้นไป และมวลรวมละเอียดซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.075-4.75 มิลลิเมตร สำหรับปูนสอควรใช้ทรายละเอียดที่มีการคละขนาดของเม็ดทราย โดยที่ทรายส่วนใหญ่ควรมีขนาดระหว่าง 0.15-1.18 มิลลิเมตร (ASTM C114-11, 4.1) และทรายควรมีรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุม เพราะขนาดและรูปร่างของเม็ดทรายส่งผลต่อความแข็งแรงและความสะดวกในการใช้งาน และทรายที่มีรูปร่าง

เป็นเหลี่ยมมุมจะทำให้ปูนแข็งแรงกว่า ส่วนปูนสำหรับฉาบนั้นจะแบ่งตามพื้นที่ที่ใช้งาน ถ้าเป็นปูนสำหรับฉาบภายนอกจะใช้ทรายละเอียดที่มีขนาดใหญ่ในสัดส่วนที่มากกว่าปูนที่ใช้ฉาบภายใน เช่น ปูนฉาบภายในไม่ควรมีทรายขนาดใหญ่กว่า 2.36 มิลลิเมตร แต่สามารถมีทรายที่ขนาดเล็กกว่า 0.15 มิลลิเมตรได้บ้าง ในขณะที่ปูนฉาบภายนอกไม่ควรมีทรายขนาดนี้เกินร้อยละ 2 เป็นต้น (Ashurst 1983, 43) นอกจากทรายแล้ว อาจมีวัสดุทำหน้าที่เป็นมวลรวมได้อีก เช่น ก้อนปูน ผงอิฐ เศษอิฐ และอาจมีส่วนผสมเพิ่มเติมเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของปูนให้เหมาะกับการใช้งานในแต่ละประเภทซึ่งอาจเหมือนหรือแตกต่างกันไปตามแต่ละท้องถิ่น เช่น ยางบง น้ำมันตังอิ๊ว น้ำตาลอ้อย กาวหนังสัตว์ เป็นต้น

ปูนที่ใช้ในการผสมปูนสอและปูนฉาบในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมในสมัยโบราณมีหลายประเภท เช่น ปูนขาว ปูนปลาสเตอร์ (ปูนยิปซั่ม) ปูนซีเมนต์พอซโซลาน เป็นต้น ซึ่งปูนสอและปูนฉาบในสมัยโบราณส่วนใหญ่จะทำมาจากปูนขาว ในอียิปต์มีการใช้ปูนสอทำจากปูนขาวและปูนยิปซั่มอยู่บ้างในสิ่งก่อสร้างที่เป็นทางเดินหินและในการก่อสร้างปิรามิด (Wilkinson, 2000: 41; Kirca, 2005) และใช้ปูนฉาบที่ทำจากปูนยิปซั่ม (Bierbrier, 1982: 47) ชาวโรมันใช้ปูนสอที่เป็นส่วนผสมจากทราย ปูนขาว และพอซโซลาน (หรือพอซโซลานา-ผู้วิจัย) ในการก่อหินที่ไม่ได้ตัดให้เป็นรูปทรง (Harris, 1983: 387) และใช้ปูนฉาบทำด้วยปูนขาวและทรายหรือพอซโซลานเพื่อเตรียมพื้นผิวในการทำภาพจิตรกรรมฝาผนัง (Liversidge, 1983: 100) ในประเทศอินเดียมีการใช้ปูนขาวในการสร้างท่อระบายน้ำและพื้น ที่เมืองหะรัปปา (Harappa) ในแคว้นสินธ์ โดยเป็นปูนขาวที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย (Ghosh, 1989: 74) หรือมีการใช้ปูนยิปซั่มเป็นปูนสออยู่บ้าง เช่น ที่เมืองโมเหนโจดาโร (Mohenjo-daro) ในแคว้นปัญจาบ ในประเทศไทยมีการนำปูนขาวมาใช้เป็นวัสดุประสานในรูปของปูนฉาบมาตั้งแต่สมัยทวารวดี (ประมาณพุทธศตวรรษที่ 11-16) และได้พบร่องรอยที่สันนิษฐานว่าเป็นเตาเผาปูนด้วย ต่อมาในสมัยสุโขทัยก็ใช้ปูนขาวเป็นปูนฉาบและพบเตาเผาหินปูนเช่นเดียวกัน (Wongsawan, 2002: 1, 3, 34) ส่วนในสมัยอยุธยานิยมใช้ปูนขาวเป็นวัตถุดิบในการผสมปูนสอและปูนฉาบในงานก่อสร้างสถาปัตยกรรม รวมทั้งยังพบเตาเผาปูนและบ่อหมักปูนในบริเวณโบราณสถาน เช่น ที่วัดไชยวัฒนาราม (Pengtako, 1994: 59-60) วัดเตว็ด (Matichon Online, 2017) เป็นต้น

7. ปูนขาว-ปูนซีเมนต์ขาวคืออะไร เหมือนหรือต่างกันอย่างไร

7.1 ปูนขาว (Lime)

ปูนขาวสามารถแบ่งตามลักษณะการแข็งตัวได้เป็น 2 ประเภท คือ ปูนขาวที่แข็งตัวในอากาศ (air lime หรือ non-hydraulic lime) และปูนขาวที่แข็งตัวได้ในน้ำ (hydraulic lime) ซึ่งทั้ง 2 ประเภทนี้มีความแตกต่างกัน กล่าวคือปูนขาวที่แข็งตัวในอากาศ (air lime) ได้มาจากการนำหินซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate หรือ $CaCO_3$) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น หินปูน หินอ่อน หินชอล์ก หรือเปลือกหอยมาเผาไฟที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปตามกระบวนการที่เรียกว่า *“แคลซิเนชั่น (calcination)”* หรือแคลไซนิ่ง (calcining) และได้ปูนที่เรียกว่าปูนสุก (quick lime หรือ calcium oxide, CaO) (TIS, 2005; Kirca, 2005) อย่างไรก็ดี มีการเรียกปูนในช่วงที่เป็นแคลเซียมออกไซด์หรือควิกไลม์ (quick lime) เป็นภาษาไทยหลายชื่อ บ้างเรียกปูนสุก (TIS, 2005: 3) บ้างเรียกปูนดิบ (Prasartsert, 1997: 59; Chungsiriarak, 2017: 213) ดังนั้นเพื่อป้องกันความสับสน ในงานวิจัยนี้จะขอทับศัพท์ปูนที่ได้จากการ

เผาหินปูนนี้ว่า *“ควิกไลม์”* ควิกไลม์สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นได้เร็วมาก เมื่อนำก้อนควิกไลม์มาพรมหรือเพิ่มน้ำในปริมาณหนึ่งที่เพียงพอจะเกิดการแตกตัวกลายเป็นผงปูนขาวไฮเดรต (dry hydrated lime powder) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, $Ca(OH)_2$) ตามกระบวนการไฮเดรชั่น (hydration) หรือสเลกกิ้ง (slaking) (Torney and Snow, 2014: 9) ซึ่งเมื่อนำควิกไลม์หรือผงปูนขาวไฮเดรตมาแช่ในน้ำจะได้ผลิตภัณฑ์คือปูนหมัก (lime putty, fat lime หรือ slaked lime) ดังสมการเคมีดังนี้

$$CaCO_3 \xrightarrow{\text{เผา}} CaO + CO_2$$

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$$

ปูนขาวหมักเป็นของเหลวข้นสีขาว ซึ่งในบ่อหรือถังหมักปูน เนื้อปูนขาวที่เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนอยู่ด้านล่าง โดยมีน้ำปูน (สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์) หล่อไว้อยู่ด้านบน ปูนหมักสามารถนำไปใช้เป็นปูนสอหรือปูนฉาบ (รวมทั้งนำไปตำเพื่อใช้เป็นปูนฉาบหรือปูนปั้น) ในขณะที่น้ำปูนสามารถนำไปใช้เติมในส่วนผสมปูนแทนน้ำ ในกรณีที่จำเป็นต้องเพิ่มน้ำลงในส่วนผสมปูน หรือนำไปใช้พ่นใส่เนื้อปูนที่กำลังจะเสื่อมสภาพ หรือพ่นใส่ผนังปูนฉาบเพื่อให้ปูนฉาบแข็งแรงขึ้นได้ (Peterson, 1981: 53-61) ส่วนปูนตำคือการนำปูนหมักหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาตำหรือโขลกร่วมกับทรายและส่วนผสมอื่นๆ เช่น กาวและเส้นใย (Nim-ngarm, 2007: 41) โดยที่เยื่อกระดาษหรือเส้นใยช่วยเสริมคุณสมบัติของปูนในด้านการเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงในช่วงแรกก่อนที่ปูนจะแข็งตัว กาวหรือข้าวเหนียวช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น (plasticity) ให้ปูนและทำให้ปูนมีความหนืดที่เหมาะสม (workability) ในการนำไปใช้งาน รวมทั้งอาจมีการเพิ่มส่วนผสมอื่นๆ ตามแต่ละท้องถิ่น เช่น น้ำมันตังอิ๊ว ยางบง กล้วยบด ฯลฯ โดยต้องตำส่วนผสมนี้ให้ละเอียดและเข้ากันจนเหนียวและหนืดจนเหมาะแก่การนำไปใช้งานแต่ละประเภท

การนำไปใช้งานคือการนำปูนหมักหรือปูนขาวไฮเดรตนี้ไปผสมกับมวลรวมและสิ่งเพิ่มเติมอื่นๆ เช่น ผงอิฐ อิฐหัก เศษกระเบื้อง เส้นใย ฯลฯ โดยทั่วไปจะใช้ปูนขาวหมัก 1 ส่วนมาผสมกับทราย 3-10 ส่วน (Bucher, 1996: 272) แล้วนำไปใช้สอหรือก่อเพื่อยึดวัสดุก่อเช่นก้อนอิฐให้ติดกัน หรือนำไปฉาบผิวหน้าของผนังหรือกำแพง ซึ่งเมื่อนำมาสอหรือฉาบแล้ว น้ำในปูนหมักจะระเหยออก ในขณะที่ปูนหมักจะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ แล้วส่งผลให้ปูนหมักแข็งตัวกลายเป็นหินปูนหรือปูนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยกระบวนการที่เรียกว่ากระบวนการคาร์บอเนชั่น (carbonation) ดังสมการ

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

จากการที่ปูนขาวหมักหรือปูนขาวไฮเดรตต้องใช้กระบวนการคาร์บอเนชั่นในการแข็งตัว จึงไม่เหมาะจะนำไปใช้งานภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูงหรืออยู่ใต้ดินที่มีระดับน้ำใต้ดินสูง ปูนขาวที่แข็งตัวได้ในน้ำ (hydraulic lime) จึงเหมาะกับการใช้งานในสภาพแวดล้อมดังกล่าวมากกว่า โดยปูนขาวไฮดรอลิกสามารถแบ่งออกได้เป็นปูนขาวไฮดรอลิกธรรมชาติที่แข็งตัวได้ในน้ำ (natural hydraulic lime) และปูนขาวผสมให้แข็งตัวได้ในน้ำ (artificial hydraulic lime) ปูนขาวไฮดรอลิกธรรมชาติได้มาจากการเผาหินปูนที่มีแคลเซียม

คาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก แต่มีแร่ธาตุอื่นๆ เช่นซิลิกาและอลูมินาปะปนอยู่ด้วย (Torney and Snow, 2014: 10) ในขณะที่ปูนขาวผสมให้มีคุณสมบัติแข็งตัวได้ในน้ำ คือการนำเอาวัสดุพอซโซลาน (pozzalanic materials) หรือวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา เช่น แก้วภูเขาไฟ (volcanic glass) หินเถ้าภูเขาไฟ (volcanic tuff) ดินที่มีไดอะตอมเป็นองค์ประกอบหลัก (diatomaceous earth) ดิน เถ้าลอย (fly ash) หรือเปลือกหอยมาผสมกับปูนขาว ซึ่งตัววัสดุพอซโซลานเองมีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (หรือปูนขาวหมัก-ผู้วิจัย) กลายเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเหมือนกับซีเมนต์ได้แม้ในสภาวะที่ชื้นหรืออยู่ใต้น้ำ (Muangtong and Nekhamanurak, 2014: 4; Kirca, 2005, 92-93) โดยการแข็งตัวของปูนไฮดรอลิกเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างปูนขาวไฮเดรตและผงซิลิกา โดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศแต่มีน้ำหรือความชื้นมาช่วย ซึ่งแตกต่างจากการแข็งตัวของปูนขาวหมักที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์มาช่วยในการทำปฏิกิริยาและต้องกำจัดน้ำออกจากตัวด้วย (Kirca, 2005: 93) ในอดีตชาวโรมันเป็นชนชาติแรกที่ใช้พอซโซลานจากการนำผงเถ้าภูเขาไฟของเมือง Pozzuoli ในประเทศอิตาลี มาผสมกับปูนขาวแล้วได้ปูนซีเมนต์ธรรมชาติที่เรียกว่าปูนพอซโซลาน (pozzolan cement) หรือปูนโรมัน (Roman cement) (Harris, 1983: 43; Kirca, 2005, 91) แต่ในปัจจุบันเราเรียกสารหรือวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นพอซโซลานโดยไม่จำเป็นต้องมาจากประเทศอิตาลีว่าสารพอซโซลาน (pozzolan) หรือวัสดุพอซโซลาน และเรียกปูนขาวที่ผสมวัสดุพอซโซลานว่าปูนพอซโซลาน

ทั้งนี้สารหรือวัสดุที่ทำให้ปูนขาวมีคุณสมบัติที่สามารถแข็งตัวได้ในน้ำอาจรวมไปถึงปูนซีเมนต์ด้วย แต่จะเรียกปูนนั้นว่าปูนซีเมนต์ผสมปูนขาวหรือปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปูน 2 ชนิด และยิ่งสัดส่วนของปูนซีเมนต์ในปูนขาวมากขึ้นเท่าไหร่ ก็จะยิ่งทำให้ปูนนั้นไม่เหมาะต่อการนำมาใช้ในงานอนุรักษ์โบราณสถานมากขึ้นเท่านั้น (Torney and Snow, 2014: 11) ซึ่งต่างจากปูนพอซโซลานที่ยังสามารถนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ ปูนขาวสามารถแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีได้เช่นกัน โดยแบ่งเป็น

1) ปูนขาวแคลเซียมสูง (high-calcium lime) ซึ่งได้มาจากการเผาหินปูนที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 50 แต่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่เพียงไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งก็คือปูนขาวทั่วไปที่ใช้ในการก่อสร้างแบบโบราณ (Historic Scotland, 1995)

2) ปูนขาวแมกนีเซียม (magnesian lime) ได้มาจากการเผาหินปูนแมกนีเซียน (magnesian limestone) ที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 35

3) ปูนขาวโดโลไมต์ (dolomite lime) ได้มาจากการเผาหินปูนโดโลไมต์ที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 35 ถึงร้อยละ 46 (TIS, 2005: 1; Hewlett, 2004: 27) ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์คือควิกไลม์ (CaO) และเพริเคลส (periclase) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซึ่งจะใช้เวลาในการหมักเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้กลายเป็นบรูไซต์ (brucite, $Mg(OH)_2$) นานกว่าควิกไลม์ที่เมื่อเกิดไฮเดรชั่นแล้วกลายเป็นพอร์ตแลนไดต์ (portlandite คือชื่อแร่ของ $Ca(OH)_2$) เมื่อนำปูนโดโลไมต์หมักไปใช้งานและเกิดกระบวนการคาร์บอเนชั่นกับอากาศ พอร์ตแลนไดต์ (ปูนหมัก) จะแข็งตัวเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต แต่บรูไซต์จะใช้เวลานานกว่ามากในการแข็งตัวเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนต (แมกนีไซต์-magnesite, $MgCO_3$) จึงทำให้ปูนโดโลไมต์ที่แข็งตัวจะมีบรูไซต์เหลืออยู่ค่อนข้างมาก ซึ่งบรูไซต์ แมกนีไซต์ หรือสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกซีคาร์บอเนตอื่นๆ (magnesium

hydroxycarbonate compounds) ที่ประกอบอยู่ในปูนโดโลไมต์นี้ มีโอกาสจะทำปฏิกิริยากับฝนกรด (ฝนที่ตกผ่านก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศแล้วกลายเป็นกรดซัลฟุริก) แล้วทำให้เกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟตได้ง่าย (Boynton, 1980: 209-226; Klemm and Siedel, 2002: 419-429 cited in Hartshorn, 2012: 8) ดังนั้นโดยหลักการแล้วจึงไม่ควรนำปูนโดโลไมต์มาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถาน เพราะเกลือซัลเฟตเป็นอันตรายต่อวัสดุโบราณที่มีรูพรุน เช่น อิฐหรือหิน (Watsantachad, 2006-2007: 240)

4) ปูนขาวยิปซั่ม (selenitic lime) ซึ่งได้มาจากการเพิ่มแคลเซียมซัลเฟต (ปูนยิปซั่ม, $CaSO_4.2H_2O$) ประมาณร้อยละ 5 ลงในส่วนผสมของปูนขาว หรืออาจเป็นการเติมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลงไปในเตาเผาปูน เติมกรดซัลฟุริกลงไปในน้ำที่หมักแช่ปูน หรือเติมยิปซั่มลงไปในปูนขาวไฮดรอลิก เพื่อทำให้ปูนขาวแข็งตัวได้เร็วขึ้นและแข็งแรงขึ้น (Edwards, 2005: 20) แต่เนื่องจากมีซัลเฟตเป็นส่วนประกอบอยู่จึงไม่เหมาะจะนำมาเป็นใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานเช่นเดียวกับปูนโดโลไมต์

7.2 ปูนซีเมนต์ขาว (White Cement)

ปูนซีเมนต์ขาวเป็นปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปูนซีเมนต์เทา) ทุกประการ ยกเว้นมีสีที่ขาวหรือขาวกว่ามาก (Hoque, F., Gani and Hoque, N., 2014: 61) ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นปูนไฮดรอลิกชนิดหนึ่งที่ได้มาจากการบดปูนเม็ด (clinker) ที่มีองค์ประกอบหลักอย่างน้อยสองในสามคือ แคลเซียมซิลิเกต ($CaO{\cdot}SiO_2$) ส่วนที่เหลือประกอบไปด้วยปูนเม็ดที่มีอลูมินาและเหล็กเป็นองค์ประกอบ รวมทั้งสารประกอบอื่นๆ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (ที่ไม่ควรเกินร้อยละ 5) และมีการเติมแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$ หรือยิปซั่ม, $CaSO_4.2H_2O$) ไปบดรวมกับปูนเม็ดเพื่อช่วยหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ (Meade, 1906: 4-14; EN 197-1:2000, 8; Joyklad and Pimanmas, n.d.) โดยที่ปูนเม็ดนั้นเกิดจากการเผาส่วนผสมของวัตถุดิบเฉพาะ ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นออกไซด์ต่างๆ เช่น แคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา (ซิลิกอนไดออกไซด์) อลูมิเนียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และอื่นๆ โดยบดและผสมจนเป็นเนื้อเดียวแล้วเผาที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งในอดีตก็คือการเผาหินปูนกับปูนขาวและดินเหนียว และต่อมาก็ได้พัฒนาด้วยการเพิ่มดินสอพองหรือหินชอล์กเข้าไปด้วย

ถ้าแบ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิดปูนซีเมนต์ด้วยองค์ประกอบทางเคมี จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือพวกที่ให้ธาตุแคลเซียมหรือธาตุปูน (calcareous materials) เช่น หินปูน หินชอล์ค ดินมาร์ล เปลือกหอย เป็นต้น ในขณะที่อีกประเภทคือพวกที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม (argillaceous materials) เช่น หินดินดาน ดินดำหรือดินเหนียว หินชนวน เป็นต้น (Joyklad and Pimanmas, n.d.) ซึ่งวัตถุดิบประเภทที่ 2 นี่เองที่ทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างจากปูนขาวหรือปูนขาวไฮดรอลิก โดยปฏิกิริยาทางเคมีสำคัญที่ทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่างจากปูนขาวไฮดรอลิก คือในปูนซีเมนต์จะไม่มีปูนขาวหรือควิกไลม์ (CaO) เหลืออยู่เลย เพราะไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาหรืออลูมินาแล้วเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกต โดยเกิดเป็น belite หรือไดแคลเซียมซิลิเกต (Ca_2SiO_4 หรือ C_2S) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,260 องศาเซลเซียส และ alite หรือไตรแคลเซียมซิลิเกต (Ca_3SiO_5 หรือ C_3S) ณ อุณหภูมิ 1,260 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า (Henry and Steward, 2011: 41; Moore, 2017)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีช่วงสีตั้งแต่เทาอมเขียวไปถึงน้ำตาล ซึ่งสีของปูนนี้เกิดมาจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบในปูน ธาตุเหล่านี้ได้แก่โครเมียม แมงกานีส เหล็ก ทองแดง วาเนเดียม นิกเกิล และไททาเนียม ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ขาว ปูนเม็ดจะถูกจำกัดให้มีธาตุเหล่านี้ในปริมาณที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น จำกัดโครมิกออกไซด์

(Cr_2O_3) ให้มีน้อยกว่าร้อยละ 0.003 แมงกานีสออกไซด์ (Mn_2O_3) ให้มีน้อยกว่าร้อยละ 0.03 เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ให้มีน้อยกว่าร้อยละ 0.35 เป็นต้น รวมถึงใช้หินชอล์ก และดินขาวหรือดินเคโอลิน (kaolin หรือ China clay) แทนดินเหนียวธรรมดาที่มีเฟอริกออกไซด์เป็นองค์ประกอบอยู่ เผาโดยใช้น้ำมันหรือแก๊สแทนการเผาด้วยถ่าน และบดด้วยเครื่องบดเซรามิกแทนเครื่องบดที่ทำด้วยโลหะชุบโครเมียม (Henry and Steward, 2011: 41, 48)

ปูนซีเมนต์ขาวในปัจจุบันมีความแข็งแรงเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป คือปูนอายุ 28 วันมีความสามารถในการรับแรงกดที่ 52.5 MPa (52.5x106 นิวตัน/ตารางเมตร หรือประมาณ 535 ksc หรือกิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) ในขณะที่ปูนขาวไฮดรอลิกธรรมชาติ (class NHL 3.5) รับแรงกดได้ประมาณ 3.5-10 MPa (ประมาณ 35.7-102 ksc) และปูนขาวธรรมดารับได้เพียง 0.4 MPa (ประมาณ 4 ksc) (Henry and Steward, 2011: 48)

8. การคัดเลือกกรณีศึกษาเพื่อเก็บตัวอย่างมาศึกษาคุณสมบัติ

หลักเกณฑ์ในการเลือกโบราณสถานเพื่อเก็บตัวอย่างปูนมาศึกษาคุณสมบัติมีดังนี้

1. เป็นโบราณสถานที่สร้างขึ้นหรือได้รับการบูรณะในสมัยพระนครศรีอยุธยา (พ.ศ. 1893-2310) โดยแบ่งเป็นสมัยอยุธยาตอนต้น อยุธยาตอนกลาง และอยุธยาตอนปลาย และจะให้ความสำคัญในการเลือกโบราณสถานที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์มากกว่า

2. เป็นโบราณสถานที่ตั้งอยู่ในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา หรือพื้นที่บนฝั่งตรงข้ามของแม่น้ำรอบเกาะเมือง

3. เป็นโบราณสถานที่มีปูนสอและปูนฉาบหลงเหลืออยู่ โดยจะต้องเป็นปูนอยุธยาดั้งเดิม (HAL) หรือปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (MLC) ในการบูรณะที่ผ่านมา โดยเน้นที่จำนวนชนิดของปูนที่ปรากฏอยู่มากกว่า

4. เป็นโบราณสถานที่ได้รับอนุญาตจากกรมศิลปากรให้เข้าถึงได้ทั้งในเชิงกายภาพและในเชิงข้อมูล

5. เป็นโบราณสถานที่มีปูนสอและปูนฉาบที่ชำรุดหรือหลุดร่อนอยู่และพร้อมที่จะถูกเก็บตัวอย่าง เนื่องจากการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ (โดยเฉพาะการวิเคราะห์ในห้องทดลอง) ถึงแม้ว่าอาจจะใช้ปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อย แต่ก็จัดว่าเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ทำลายโบราณสถานและวัสดุดั้งเดิม (destructive method) ดังนั้นการเลือกเก็บตัวอย่างวัสดุเพื่อนำไปวิเคราะห์จึงให้ความสำคัญต่อการเลือกเก็บวัสดุที่ชำรุด หลุดร่อน หรือนำกลับมาใช้ในการบูรณะใหม่ไม่ได้ มากกว่าการเจาะทำลายโบราณสถานหรือวัสดุดั้งเดิมเพื่อเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์

เมื่อพิจารณารายชื่อแหล่งโบราณสถาน 17 แหล่งที่กรมศิลปากรและองค์การยูเนสโกได้เสนอในการประชุมผู้เชี่ยวชาญเพื่อประเมินคุณภาพงานอนุรักษ์ในโบราณสถานแหล่งมรดกโลกพระนครศรีอยุธยา[5] จะเห็นได้ว่าแหล่งโบราณสถานทั้ง 17 แหล่งนั้นเป็นวัดที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอพระนครศรีอยุธยาและถูกสร้างขึ้นหรือได้รับการบูรณะปฏิสังขรณ์ในสมัยกรุงศรีอยุธยา ซึ่งควรเป็นแหล่งที่สามารถเก็บตัวอย่างปูนดั้งเดิมของอยุธยา (HAL) ได้ รวมทั้งเป็นวัดที่ได้รับ

[5] การประชุมจัดขึ้นเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ.2559 ณ กรมศิลปากร ได้มีการนำเสนอแหล่งโบราณสถาน 17 แหล่งซึ่งได้รับการบูรณะครั้งล่าสุดเมื่อ พ.ศ. 2555 หลังจากประสบอุทกภัยเมื่อปี พ.ศ. 2554 เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินคุณภาพงานอนุรักษ์ของโบราณสถาน ซึ่งโบราณสถาน 17 แหล่งนั้นประกอบไปด้วย 1) วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ 2) วัดราชบูรณะ 3) วัดส้ม 4) วัดมหาธาตุ 5) วัดเจ้าพรามหมณ์ 6) ป้อมเพชร 7) วัดสะพานนาค 8) วัดขุนเมืองใจ 9) วัดญาณเสน 10) วัดบรมพุทธาราม 11) วัดวรเชษฐาราม (นอก) (หรือวัดวรเชตุ(หรือวรเชษฐ์)เทพบำรุง–ผู้วิจัย) 12) วัดไชยวัฒนาราม 13) วัดกุฎีดาว 14) วัดอโยธยา 15) วัดแค 16) วัดมเหยงคณ์ และ 17) วัดดุสิดาราม

การบูรณะภายหลังการเกิดอุทกภัย พ.ศ.2554 ทั้งหมด จึงค่อนข้างแน่นอนว่าจะต้องมีปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขาว (MLC) ปรากฏอยู่ไม่มากก็น้อย ซึ่งทำให้วัดทั้ง 17 วัดนี้ผ่านหลักเกณฑ์ในการคัดเลือกข้อที่ 1, 2 และ 3 แต่จากหลักเกณฑ์ข้อที่ 3 ที่ให้ความสำคัญกับชนิดของปูนที่หลงเหลืออยู่และจำนวนชนิดของปูนที่ปรากฏอยู่มากกว่า รวมทั้งหลักเกณฑ์ข้อที่ 5 ที่ให้ความสำคัญกับการรบกวนโบราณสถานและวัสดุดั้งเดิมให้น้อยที่สุด และให้ผ่านหลักเกณฑ์ข้อที่ 4 เรื่องการได้รับอนุญาตให้เข้าถึงจากกรมศิลปากร ผู้วิจัยพร้อมทั้งผู้เชี่ยวชาญและเจ้าหน้าที่จากองค์การยูเนสโกจึงได้ขอความอนุเคราะห์จากผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของสำนักศิลปากรที่ 3 พระนครศรีอยุธยา เข้าสำรวจพื้นที่แหล่งโบราณสถานเพื่อสำรวจหาความเป็นไปได้ในการเก็บตัวอย่างปูนเพื่อนำมาศึกษาโดยรบกวนหรือทำลายโบราณสถานและวัสดุดั้งเดิมให้น้อยที่สุดตามหลักเกณฑ์ข้อที่ 5 แล้วจึงดำเนินการเก็บตัวอย่างปูน[6] ซึ่งผลจากการสำรวจและเก็บตัวอย่างสามารถนำมาสรุปประเภทของปูนที่ศึกษาและแหล่งที่มาได้ดังนี้

หมวดปูนโบราณที่พบในโบราณสถานอยุธยา (HAL) ซึ่งแบ่งเป็น

1. ปูนสอโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนต้น (HAL/E-m)
    1) ปรางค์ประธาน วัดมหาธาตุ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/E1-m
    2) เจดีย์ช้างล้อม วัดมเหยงคณ์ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/E2-m
    3) เสาอุโบสถ วัดพระนอน ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/E3-m
2. ปูนฉาบโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนต้น (HAL/E-p)
    1) ปรางค์ประธาน วัดมหาธาตุ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/E1-p
    2) เจดีย์ช้างล้อม วัดมเหยงคณ์ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/E2-p
    3) เสาอุโบสถ วัดพระนอน ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/E3-p
3. ปูนสอโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนกลาง (HAL/M-m)
    1) วิหารหลวง (วิหารพระศรีสรรเพ็ชญ์) วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/M1-m
    2) วิหารพระป่าเลไลย์ วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/M2-m
    3) ปรางค์ประธาน วัดวรเชตเทพบำรุง ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/M3-m
4. ปูนฉาบโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนกลาง (HAL/M-p)
    1) วิหารหลวง (วิหารพระศรีสรรเพ็ชญ์) วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/M1-p

[6] คณะสำรวจประกอบไปด้วย: ศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ชัย สายสิงห์ (ผู้เชี่ยวชาญด้านประวัติศาสตร์ศิลปะและสถาปัตยกรรม) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิบูลย์ จินาวัฒน์ (ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมและการอนุรักษ์สถาปัตยกรรม) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉวีวรรณ ประจวบเหมาะ และ ดร.ปริตตา เฉลิมเผ่า กออนันตกูล (ผู้เชี่ยวชาญด้านสังคมวิทยาและมานุษยวิทยา) คุณประทีบ เพ็งตะโก (รองอธิบดีกรมศิลปากร ในขณะนั้นดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการสำนักศิลปากรที่ 3 พระนครศรีอยุธยา) คุณอรรถสิทธิ์ อินต๊ะ (ผู้ควบคุมงานอนุรักษ์กรมศิลปากร) คุณมนทกานติ์ ส. กิตติไพศาลศิลป์ (เจ้าหน้าที่องค์การยูเนสโกและผู้ประสานงานโครงการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวลลักษณ์ วัสสันตชาติ (ผู้วิจัย) คุณปิยธิดา พิชชโยธิน (ผู้ช่วยผู้วิจัย) และคุณนิพนธ์ กฤษณวิภาคพร (ผู้ช่วยผู้วิจัย)

2) วิหารพระป่าเลไลย์ วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/M2-p
3) ปรางค์ประธาน วัดวรเชตเทพบำรุง (วัดวรเชษฐาราม (นอก) ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/M3-p

5. ปูนสอโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนปลาย (HAL/L-m)
   1) อุโบสถ วัดบรมพุทธาราม ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/L1-m
   2) เจดีย์ทองแดง วัดมเหยงคณ์ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/L2-m
   3) เมรุรายหมายเลข C4 วัดไชยวัฒนาราม ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/L3-m
6. ปูนฉาบโบราณที่พบในโบราณสถานสมัยอยุธยาตอนปลาย (HAL/L-p)
   1) อุโบสถ วัดบรมพุทธาราม ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/L1-p
   2) เจดีย์ทองแดง วัดมเหยงคณ์ ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/L2-p
   3) เมรุรายหมายเลข C4 วัดไชยวัฒนาราม ในการทดสอบใช้รหัสว่า HAL/L3-p

หมวดปูนสมัยใหม่ (MLC) แบ่งเป็น

1. ปูนสอหล่อขึ้นใหม่ที่ทำมาจากปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขาว ผสมตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ขาว:ปูนขาวหมัก:ทราย= 1:8:24[7] ในการทดสอบใช้รหัสว่า NMLC/FA-m
2. ปูนสอหล่อขึ้นใหม่ที่ทำมาจากปูนขาวหมัก ผสมตามอัตราส่วนมาตรฐานทั่วไป โดยมีปูนหมัก:ทราย= 1:3[8] ในการทดสอบใช้รหัสว่า NL/FA-m
3. ปูนสอที่ทำมาจากปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ที่พบในโบราณสถานอยุธยา (ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา) โดยได้มาจากอุโบสถของวัดแค ในการทดสอบใช้รหัสว่า MLC/U-m
4. ปูนฉาบที่ทำมาจากปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ที่พบในโบราณสถานอยุธยา (ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา) โดยได้มาจากอุโบสถของวัดแค ในการทดสอบใช้รหัสว่า MLC/U-p

[7] ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักศิลปากรที่ 3 กรมศิลปากร ในการหล่อก้อนปูนตามอัตราส่วนนี้เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ

[8] อัตราส่วนผสมของปูนขาวหมักเพื่อใช้ในการก่อนี้เป็นอัตราส่วนมาตรฐานที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักศิลปากรที่ 3 กรมศิลปากร ในการหล่อก้อนปูนเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ตามอัตราส่วนที่โดยปกติแล้วกรมศิลปากรก็ใช้ในการบูรณะโบราณสถานตามที่ระบุไว้ในรายการประกอบแบบ (FAD, 2012a: 6)

9. ผลการศึกษาวิเคราะห์ และการอภิปรายผลการศึกษา

ในการศึกษาคุณสมบัติของปูนโดยเฉพาะเพื่อการอนุรักษ์นั้น ได้แบ่งการศึกษาและทดสอบออกเป็น 3 ด้านหลัก คือ คุณสมบัติทางแร่ธาตุและเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเชิงกล (Watsantachad, 2018: 12) โดยผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

9.1 คุณสมบัติทางแร่ธาตุหรือเคมี (Mineral and Chemical Properties)

• องค์ประกอบทางแร่ธาตุและเคมี และโครงสร้างของวัสดุ

ตารางที่ 1: โครงสร้างของปูนสออยุธยา

คุณสมบัติ		รูปร่าง				การคัดขนาด			ขนาด (มม.)	
#	ชื่อตัวอย่าง	เหลี่ยม	กึ่งเหลี่ยม	กึ่งกลม	กลม	ไม่ดี	กลาง	ดี	เล็กที่สุด	ใหญ่ที่สุด
1	HAL/E1-m	O	O	O	O		O		1.00	4.00
3	HAL/E2-m	O	O	O	O	O			1.00	2.50
5	HAL/E3-m	O	O	O	O		O		0.50	1.50
7	HAL/M1-m			O	O			O	0.25	0.50
9	HAL/M2-m	O	O	O	O	O			0.25	4.00
11	HAL/M3-m	O	O	O	O		O		1.00	3.00
13	HAL/L1-m		O	O	O		O		0.50	1.50
15	HAL/L2-m		O	O	O	O			1.25	5.00
17	HAL/L3-m			O	O			O	0.50	0.50
21	NMLC/FA-m	O	O	O		O			0.50	3.50
22	NL/FA-m	O	O	O	O	O			0.25	2.00
23	MLC/U-m		O	O	O	O			0.25	2.50

ตารางที่ 2: โครงสร้างของปูนฉาบอยุธยา

คุณสมบัติ		รูปร่าง				การคัดขนาด			ขนาด (มม.)	
#	ชื่อตัวอย่าง	เหลี่ยม	กึ่งเหลี่ยม	กึ่งกลม	กลม	ไม่ดี	กลาง	ดี	เล็กที่สุด	ใหญ่ที่สุด
2	HAL/E1-p	O	O	O				O	1.00	1.50
4	HAL/E2-p		O	O	O	O			0.50	2.00
6	HAL/E3-p			O	O	O			0.40	2.00
8	HAL/M1-p		O	O	O	O			0.25	2.00
10	HAL/M2-p			O	O	O			0.10	3.00
12	HAL/M3-p		O	O	O	O			0.50	4.00
14	HAL/L1-p		O	O	O	O			0.25	3.00
16	HAL/L2-p	O	O	O	O	O			1.50	3.00
18	HAL/L3-p	O	O	O	O		O		0.50	5.00
21	NMLC/FA-m	O	O	O		O			0.50	3.50
22	NL/FA-m	O	O	O	O	O			0.25	2.00
24	MLC/U-p			O	O	O			0.50	5.00

ตัวอย่างปูนได้รับการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ และทดสอบด้วยวิธีตรวจแร่ทางศิลาวรรณา ณ กองวิเคราะห์และตรวจสอบทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี เพื่อตรวจหาธรณีวัตถุในปูนอยุธยา รวมทั้งตรวจดูโครงสร้างของปูนตัวอย่าง ซึ่งผลการทดสอบพบว่ามวลรวมของปูนสอแต่ละยุคมีขนาดตั้งแต่ 0.25 มิลลิเมตรไปจนถึง 5.0 มิลลิเมตร โดยการคัดขนาดของมวลรวมแต่ละชนิดจะมีทั้งแบบดีและไม่ดี รวมทั้งแบบปานกลาง (ดูตารางที่ 1) ซึ่งหมายความว่าปูนสอโบราณของอยุธยามีการใช้มวลรวมที่มีขนาดค่อนข้างหลากหลายและมิได้มีลักษณะเฉพาะในแต่ละยุค อย่างไรก็ตามหากพิจารณาทีละยุคพบว่า ขนาดของมวลรวมที่พบในปูนสอของในโบราณสถานยุคต้นทั้ง 3 แห่งมีขนาดประมาณ 1.0-1.5 มิลลิเมตร แต่ปูนสอที่นำมาจากโบราณสถานยุคกลางและยุคปลายไม่มีขนาดของมวลรวมที่แน่นอน แต่หากพิจารณาโดยรวมแล้วอาจสรุปได้ว่าขนาดของมวลรวมที่เป็นที่นิยมใช้ในปูนโบราณอยุธยาคือประมาณ 0.5-1.25 มิลลิเมตร ในกรณีที่พิจารณาด้านรูปร่างของอนุภาคมวลรวม จะเห็นได้ว่าปูนสอของโบราณสถานยุคต้นมีความหลากหลายของรูปร่างมวลรวมมากกว่ายุคอื่น กล่าวคือมีทั้งรูปร่างเหลี่ยม กึ่งเหลี่ยม กึ่งกลม และกลม ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับปูนสอของโบราณสถานในยุคกลาง (ยกเว้นปูนสอที่วิหารหลวง วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ที่ไม่พบมวลรวมรูปร่างเหลี่ยม) ในขณะที่ปูนสอของโบราณสถานยุคปลายไม่มีมวลรวมรูปร่างเหลี่ยมปะปนอยู่เลย ซึ่งคล้ายคลึงกับรูปร่างมวลรวมของปูนสอที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา ณ อุโบสถของวัดแค ส่วนปูนสอที่หล่อใหม่ตามอัตราส่วนที่กรมศิลปากรกำหนดนั้น มีการใช้อนุภาคมวลรวมที่อาจมิได้มีการคัดแยกรูปร่างก่อนการผสม จึงทำให้ปูนที่ได้มี

รูปร่างของมวลรวมที่หลากหลายและคล้ายคลึงกับปูนโบราณในโบราณสถานยุคต้นและบางส่วนของยุคกลาง แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าปูนสมัยใหม่ของกรมศิลปากรทั้งสองสูตรมีขนาดของมวลรวมที่ไม่เท่ากัน โดยปูนที่ผสมจากปูนขาวหมักล้วนมีขนาดของทรายที่เล็กกว่า และมีมวลรวมรูปร่างกลมปะปนอยู่มากกว่าปูนที่ผสมจากปูนขาวหมักและปูนซีเมนต์ขาว

การทดสอบโครงสร้างปูนฉาบของอยุธยาพบว่าปูนฉาบของแต่ละยุคมีมวลรวมขนาดตั้งแต่ 0.1 มิลลิเมตรไปจนถึง 5.0 มิลลิเมตร (ดูตารางที่ 2) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามวลรวมที่เล็กที่สุดของปูนฉาบโบราณมีขนาดเล็กกว่ามวลรวมที่เล็กที่สุดของปูนสอโบราณ แต่มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดของปูนฉาบโบราณกลับมีขนาดเท่ากับมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดของปูนสอโบราณ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะสรุปว่ามวลรวมของปูนฉาบโบราณจะต้องมีขนาดเล็กกว่ามวลรวมของปูนสอโบราณเสมอไป ซึ่งถ้าพิจารณาปูนฉาบในแต่ละยุคจะพบว่า ปูนฉาบของโบราณสถานยุคต้นนิยมใช้มวลรวมขนาด 1.0-1.5 มิลลิเมตร ในขณะที่ยุคกลางนิยมใช้มวลรวมขนาด 0.5-2 มิลลิเมตร ส่วนในยุคปลายนิยมใช้มวลรวมขนาด 1.5-3 มิลลิเมตร จึงเห็นได้ว่าปูนฉาบของยุคปลายมีมวลรวมที่ขนาดใหญ่กว่ายุคอื่น รวมทั้งมีรูปร่างที่คละกันมากกว่ายุคอื่นด้วย ส่วนการคัดขนาดของปูนฉาบแต่ละยุคจะมีทั้งแบบดีและไม่ดี รวมทั้งแบบปานกลาง แต่ส่วนใหญ่แล้วมีการคัดขนาดที่ไม่ดี ซึ่งหมายความว่าหากพิจารณาโดยใช้การคัดขนาดเป็นเกณฑ์แล้ว ปูนฉาบโบราณของอยุธยาก็มีการใช้มวลรวมที่มีขนาดค่อนข้างหลากหลายและมิได้ลักษณะเฉพาะในแต่ละยุค แต่ถ้าพิจารณาโดยภาพรวมอาจสรุปได้ว่าขนาดของมวลรวมที่เป็นที่นิยมใช้ในปูนฉาบโบราณอยุธยาคือประมาณ 1.0-2.0 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณารูปร่างของมวลรวมจะเห็นได้ว่าปูนฉาบยุคปลายมีความหลากหลายของรูปร่างมวลรวมมากกว่ายุคอื่น กล่าวคือมีทั้งรูปร่างเหลี่ยม กึ่งเหลี่ยม กึ่งกลม และกลม ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับปูนสอของโบราณสถานในยุคต้นและยุคกลาง (ยกเว้นปูนสอที่วิหารหลวง วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ที่ไม่พบมวลสารรูปร่างเหลี่ยม) และคล้ายคลึงกับรูปร่างมวลสารของปูนสอที่หล่อใหม่ตามอัตราส่วนที่กรมศิลปากรกำหนด ส่วนปูนฉาบสมัยใหม่ที่ใช้ในการอนุรักษ์อุโบสถวัดแค มีมวลสารที่มีประเภทของรูปร่างใกล้เคียงกับปูนฉาบที่ใช้บริเวณเสาอุโบสถของวัดพระนอน และมีขนาดใกล้เคียงกับมวลสารที่ใส่ในปูนฉาบของเมรุรายหมายเลข C4 ในวัดไชยวัฒนาราม

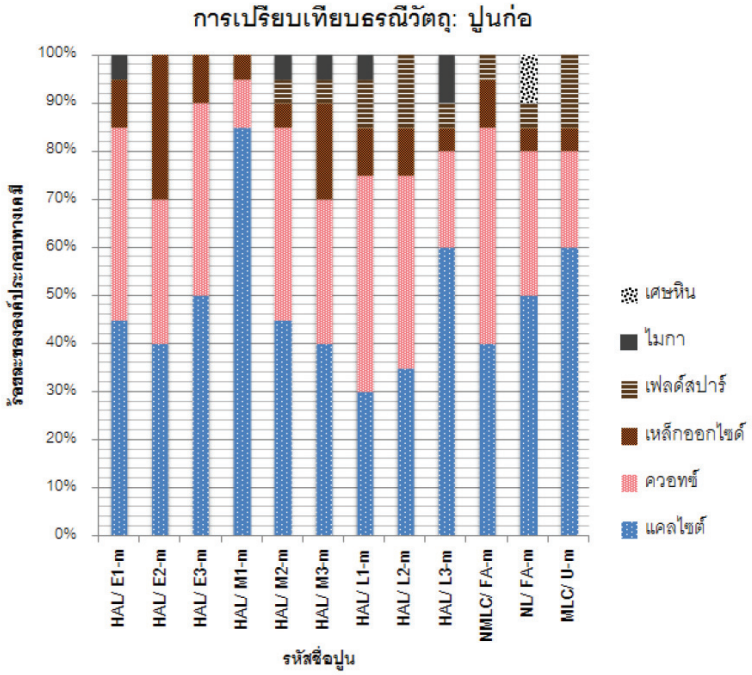
ในเรื่ององค์ประกอบทางแร่ธาตุและเคมี ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปูนสอโบราณอยุธยาประกอบด้วยแคลไซต์และควอตซ์เป็นหลัก และมีเหล็กออกไซด์ร่วมอยู่ด้วยเสมอ (ดูแผนภาพที่ 2 หน้า B-64) ซึ่งอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์จะค่อนข้างหลากหลาย จนไม่สามารถแบ่งเป็นยุคที่แน่นอนดังเช่นการแบ่งยุคของโบราณสถานตามรูปแบบศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมได้ โดยอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์มีตั้งแต่ 1:0.1 (หรือเท่ากับ 10:1) ไปจนถึง 1:1.5 ปูนสอของโบราณสถานยุคต้นมีอัตราส่วนที่ค่อนข้างคงที่ประมาณ 1:1 (1:0.8 ถึง 0.9 หรือเท่ากับ 10:8 ถึง 9) ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับปูนสอที่มาจากโบราณสถานยุคกลางส่วนใหญ่ ในขณะที่ปูนสอจากโบราณยุคปลายส่วนใหญ่จะมีปริมาณของควอตซ์มากกว่าแคลไซต์ โดยอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์ประมาณ 1:1.1 ถึง 1.5 ส่วนปูนสมัยใหม่ที่เป็นส่วนผสมระหว่างปูนขาว ทราย และปูนซีเมนต์ขาวตามอัตราส่วนของกรมศิลปากรก็มีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันคือ 1:1.5 แต่ปูนสมัยใหม่ที่ผสมจากปูนขาวล้วนผสมทราย

ถึงแม้ว่าตามสูตรแล้วจะมีอัตราส่วนปูนขาวต่อทรายเท่ากับ 1:3 แต่เมื่อทดสอบทางธรณีวัตถุแล้วพบว่ามีอัตราส่วนของแคลไซต์และควอตซ์เป็น 1:1

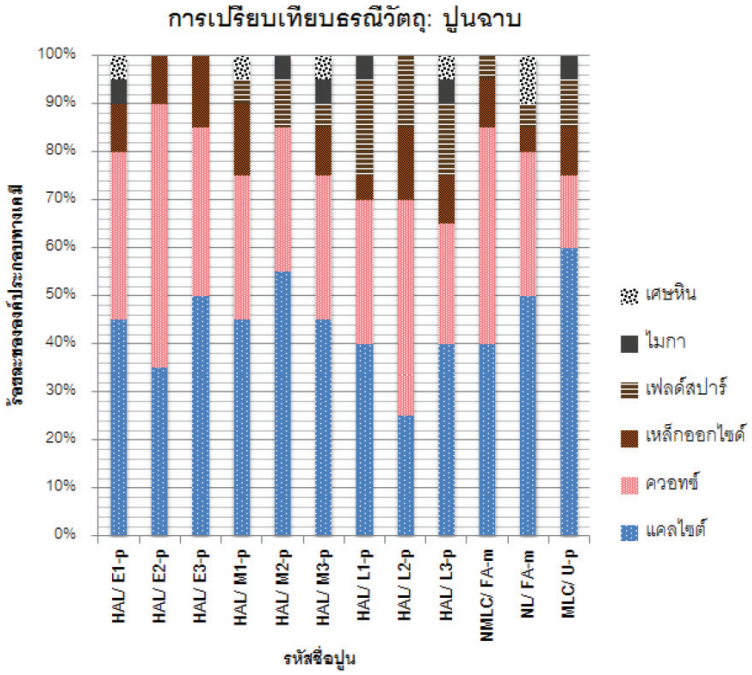
อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่านอกจากแคลไซต์และควอตซ์แล้ว ปูนสอโบราณอยุธยายังประกอบด้วยธรณีวัตถุชนิดอื่นอีก เช่น เหล็กออกไซด์ เฟลด์สปาร์ ไมกา และ/หรือเศษหิน โดยที่ปูนจากทุกแหล่งมีเหล็กออกไซด์เป็นส่วนประกอบตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง 30 โดยเฉพาะปูนสอจากโบราณสถานยุคต้น ที่มีเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 30% แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าไม่พบเฟลด์สปาร์ในปูนสอจากโบราณสถานยุคต้นเลย และพบไมกาได้เพียงส่วนน้อยเท่านั้น ในขณะที่พบเฟลด์สปาร์และไมกาประมาณร้อยละ 5-10 ค่อนข้างทั่วไปในปูนสอจากโบราณสถานยุคอื่น ๆ (ยกเว้นที่วิหารหลวง วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์) ส่วนปูนสมัยใหม่มีองค์ประกอบทางธรณีวัตถุโดยรวมที่คล้ายคลึงกับปูนโบราณ แตกต่างเพียงไม่มีไมกาเป็นองค์ประกอบ และในปูนขาวหมักผสมทรายมีเศษหินปะปนมาประมาณร้อยละ 10 และถ้าพิจารณาความคล้ายคลึงของอัตราส่วนธรณีวัตถุในปูนสมัยใหม่กับปูนโบราณอยุธยา พบว่าปูนขาวผสมซีเมนต์ขาวและปูนขาวหมักผสมทรายตามสูตรของกรมศิลปากร (อัตราส่วน 1:8:24 และ 1:3 ตามลำดับ) มีอัตราส่วนของธรณีวัตถุที่ใกล้เคียงกับปูนสอของโบราณสถานยุคต้นและยุคกลาง แต่อาจมีปริมาณมวลรวมที่น้อยไปเมื่อเทียบกับปูนสอของโบราณสถานยุคปลาย

หากตั้งสมมติฐานว่าปูนขาวหมักที่นำมาใช้ผสมเป็นปูนสอเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ และเมื่อนำมาใช้งานแล้วเกิดกระบวนการคาร์บอเนชั่นอย่างสมบูรณ์แล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่รวมให้ควอตซ์ เหล็กออกไซด์ เฟลด์สปาร์ ไมกา และเศษหินที่พบในปูนสอเป็นธรณีวัตถุที่อยู่ในมวลรวมที่นำมาผสมกับปูนขาวหมักในขั้นตอนการผสมปูน เมื่อนำผลการทดสอบทางธรณีวัตถุมาวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างปูนขาวกับมวลรวม จะพบว่าปูนสอโบราณอยุธยามีอัตราส่วนผสมระหว่างปูนขาวและมวลรวมระหว่าง 1:0.2 ถึง 2.3 โดยปูนสอที่ใช้ในโบราณสถานยุคปลายส่วนใหญ่จะมีอัตราส่วนของมวลรวมที่มากกว่าโบราณสถานยุคต้นและยุคกลาง กล่าวคือ อัตราส่วนระหว่างปูนขาวต่อมวลรวมของปูนสอของโบราณสถานยุคปลายส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง 1:1.9 ถึง 2.3 ในขณะที่ปูนสอจากโบราณสถานยุคต้นและยุคกลางส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 1:1.2 ถึง 1.5 เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์ ซึ่งก็คือธรณีวัตถุที่สำคัญที่สุดในทราย หรือจากอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อมวลรวมของธรณีวัตถุในปูน ผลการทดสอบทางธรณีวัตถุนี้อาจนำไปสู่ข้อสรุปในเบื้องต้นได้ว่า ปูนสอโบราณของอยุธยาในยุคหลังมีการใช้ทราย (หรือมวลรวม) เป็นส่วนผสมมากกว่าปูนสอโบราณในยุคก่อนหน้า หรือปูนสอในยุคแรกๆ อาจมีการเสื่อมสภาพในลักษณะที่สูญเสียวัสดุประสานจนมวลรวมหลุดร่วง (disaggregation) ไปมากกว่าปูนสอในยุคหลัง จึงทำให้มีมวลรวมหลงเหลืออยู่ในเนื้อปูนน้อยกว่า

แผนภาพที่ 2: การเปรียบเทียบธรณีวัตถุในปูนก่อยุธยา



แผนภาพที่ 3: การเปรียบเทียบธรณีวัตถุในปูนฉาบอยุธยา



ปูนฉาบโบราณอยุธยาประกอบด้วยแคลไซต์และควอตซ์เป็นหลัก และโดยมากก็จะมีเหล็กออกไซด์ร่วมอยู่ด้วย (ดูแผนภาพที่ 3) เช่นเดียวกับปูนสอโบราณ รวมทั้งอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์ก็ค่อนข้างหลากหลาย จนไม่สามารถแบ่งเป็นยุคที่ชัดเจนได้เช่นกัน โดยอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์มีตั้งแต่ 1:0.3 (หรือเท่ากับ 10:3) ไปจนถึง 1:1.8 แต่ถ้าพิจารณาตามยุคของโบราณสถานจะเห็นว่าปูนฉาบของโบราณสถานยุคกลางจะมีอัตราส่วนที่ค่อนข้างคงที่ประมาณ 1:0.5 ถึง 1:0.7 (หรือเทียบเท่า 2:1 ถึง 10:7) ในขณะที่ปูนฉาบของโบราณสถานในยุคต้นจะมีอัตราส่วนไม่แน่นอนระหว่าง 1:0.7 (หรือ 10:7) และ 1:1.6 และอัตราส่วนของปูนฉาบของโบราณสถานยุคปลายก็ไม่แน่นอนอยู่ระหว่าง 1:0.6 (หรือเทียบเท่า 5:3) และ 1:1.8 ส่วนปูนสมัยใหม่ที่เป็นส่วนผสมระหว่างปูนขาว ทราย และปูนซีเมนต์ขาวตามอัตราส่วนของกรมศิลปากร (NMLC/FA-m) ซึ่งในการอนุรักษ์บางกรณีก็นำมาใช้เพื่อฉาบด้วยนั้น มีอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์ที่ไม่เหมือนกับปูนฉาบจากโบราณสถานยุคใดเลย ในขณะที่ปูนสมัยใหม่ที่ผสมจากปูนขาวล้วนผสมทราย (NL/FA-m) กลับมีอัตราส่วนของแคลไซต์กับควอตซ์ที่ใกล้เคียงกับปูนฉาบโบราณอยุธยามากกว่า

ผลการทดสอบธรณีวัตถุในปูนฉาบโบราณอยุธยาแสดงให้เห็นว่า นอกจากแคลไซต์และควอตซ์แล้ว ยังประกอบด้วยธรณีวัตถุชนิดอื่น เช่น เหล็กออกไซด์ เฟลด์สปาร์ ไมกา และ/หรือเศษหิน โดยที่ปูนจากทุกแหล่ง (ยกเว้นปูนฉาบจากวิหารพระป่าเลไลย์ วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์) มีเหล็กออกไซด์เป็นส่วนประกอบประมาณ 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่พบเฟลด์สปาร์ในปูนฉาบจากโบราณสถานยุคต้นเลย (ซึ่งก็ไม่พบในปูนสอจากโบราณสถานยุคนี้เช่นกัน) รวมทั้งพบไมกาได้เพียงส่วนน้อยเท่านั้น ในขณะที่มีเฟลด์สปาร์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 20 และไมกาประมาณร้อยละ 5 ในปูนฉาบของโบราณสถานยุคหลังจากนั้น ส่วนปูนสมัยใหม่มีองค์ประกอบทางธรณีวัตถุโดยรวมที่คล้ายคลึงกับปูนฉาบโบราณ เพียงแต่ไม่พบไมกาแต่พบเศษหินอยู่บ้าง ซึ่งถ้าพิจารณาความคล้ายคลึงของอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์ในปูนสมัยใหม่กับปูนโบราณอยุธยา พบว่าปูนขาวหมักผสมทรายตามสูตรของกรมศิลปากร (อัตราส่วน 1:3) มีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับปูนฉาบของโบราณสถานอยุธยาทั้ง 3 ยุค

ในทำนองเดียวกันกับปูนสอ เมื่อนำผลการทดสอบทางธรณีวัตถุมาวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างปูนขาวกับมวลรวม พบว่าปูนฉาบโบราณอยุธยามีอัตราส่วนผสมระหว่างปูนขาวและมวลรวมระหว่าง 1:0.7 (หรือ 10:7) ถึง 1:3 โดยปูนฉาบที่ใช้ในโบราณสถานยุคปลายส่วนใหญ่จะมีอัตราส่วนของมวลรวมที่มากกว่าโบราณสถานยุคต้นและยุคกลาง กล่าวคืออัตราส่วนระหว่างปูนขาวต่อมวลรวมของปูนฉาบของโบราณสถานยุคปลายส่วนใหญ่คือ 1:1.5 ในขณะที่ปูนฉาบจากโบราณสถานยุคต้นและยุคกลางส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 1:1.2 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อควอตซ์หรือทรายหรือจากอัตราส่วนของแคลไซต์ต่อมวลรวมของธรณีวัตถุในปูน อาจนำไปสู่ข้อสรุปในเบื้องต้นได้เช่นเดียวกันว่าปูนฉาบโบราณของอยุธยาในยุคหลังมีการใช้ทราย (หรือมวลรวม) เป็นส่วนผสมมากกว่าปูนฉาบโบราณในยุคต้นและกลาง หรืออาจเป็นได้ว่าปูนฉาบในยุคแรกๆ มีการเสื่อมสภาพในลักษณะที่สูญเสียวัสดุประสานจนมวลรวมหลุดร่วง (disaggregation) ไปมากกว่าปูนฉาบในยุคหลัง จึงทำให้มีมวลรวมหลงเหลืออยู่น้อยกว่า

9.2 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

• สี

ตารางที่ 3: สีของปูนสออยุธยา

#	ชื่อตัวอย่าง	รหัสสี	ชื่อสี
1	HAL/ E1-m	10 YR 8.5 /1	ขาว
3	HAL/ E2-m	10 YR 8 /1	ขาว
5	HAL/ E3-m	10 YR 8.5 /2	น้ำตาลอ่อนมาก
7	HAL/ M1-m	10 YR 8 /1.5	ขาว-น้ำตาลอ่อนมาก
9	HAL/ M2-m	10 YR 8 /1	ขาว
11	HAL/ M3-m	10 YR 8 /2	น้ำตาลอ่อนมาก
13	HAL/ L1-m	10 YR 8 /1	ขาว
15	HAL/ L2-m	10 YR 7 /2	เทาอ่อน
17	HAL/ L3-m	10 YR 8.5 /1	ขาว
19	NMLC/ FA-m	10 YR 8.5 /1	ขาว
20	NL/ FA-m	10 YR 9 /1	ขาว
21	MLC/ U-m	10 YR 6.5 /2	เทาอ่อนอมน้ำตาล-เทาอ่อน

ตารางที่ 4: สีของปูนฉาบอยุธยา

#	ชื่อตัวอย่าง	รหัสสี	ชื่อสี
2	HAL/ E1-p	10 YR 8.25 /2	น้ำตาลอ่อนมาก
4	HAL/ E2-p	10 YR 8.5 /1	ขาว
6	HAL/ E3-p	10 YR 8.5 /1	ขาว
8	HAL/ M1-p	10 YR 8 /2	น้ำตาลอ่อนมาก
10	HAL/ M2-p	10 YR 8.5 /2	น้ำตาลอ่อนมาก
12	HAL/ M3-p	10 YR 8 /2	น้ำตาลอ่อนมาก
14	HAL/ L1-p	10 YR 8.5 /1	ขาว
16	HAL/ L2-p	10 YR 8 /2	น้ำตาลอ่อนมาก
18	HAL/ L3-p	10 YR 8 /1	ขาว
19	NMLC/ FA-m	10 YR 8.5 /1	ขาว
20	NL/ FA-m	10 YR 9 /1	ขาว
22	MLC/ U-p	10 YR 7 /3	น้ำตาลอ่อนมาก

การทดสอบสีของปูนในการศึกษานี้ใช้วิธีทดสอบด้วยตาเปล่าภายใต้แสงธรรมชาติของกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 5 กันยายน 2559 เวลา 14.00 น. และบันทึกการตรวจสอบสีของวัสดุเทียบกับแถบสีมาตรฐานในระบบมันเซล โดยใช้สมุดตารางเทียบสีมันเซล (Munsell Color Charts) จากการทดสอบพบว่าปูนสอโบราณอยุธยามีสีขาวถึงสีน้ำตาลอ่อนมากป (ดูตารางที่ 3) ซึ่งถ้าแบ่งตามยุคของโบราณสถานพบว่าปูนสอในโบราณสถานยุคต้นส่วนใหญ่มีสีขาว ซึ่งมีสีที่คล้ายคลึงกับปูนสอของโบราณสถานยุคปลายเช่นกัน ในขณะที่ปูนสอของโบราณสถานในยุคกลางจะมีสีที่เข้มกว่าเล็กน้อย แต่ทั้งนี้จากการที่ผลการทดสอบปูนสอในโบราณสถานของแต่ละยุคมิได้เป็นไปในทางเดียวกันทั้งหมด จึงเป็นการยากที่จะสรุปสีของปูนสอโบราณโดยแบ่งตามยุคของโบราณสถานได้

ผลการทดสอบปูนสมัยใหม่แสดงให้เห็นว่าปูนสอที่ใช้ปูนขาวหมักผสมปูนซีเมนต์ขาวและทรายในอัตราส่วน 1:8:24 เป็นสีขาวเช่นเดียวกับปูนสอที่ใช้ปูนขาวหมักล้วนผสมทรายในอัตราส่วน 1:3 ส่วนปูนสอที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมาของอุโบสถของวัดแคมีสีเทาอ่อนอมน้ำตาลถึงเทาอ่อน ไม่ใช่สีขาวเช่นเดียวกับปูนสอที่ทำจากปูนขาวหมักผสมปูนซีเมนต์ขาว ซึ่งการที่ปูนสอสมัยใหม่ที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมานี้มีสีที่เข้มและเทากว่าปูนขาวหมัก อาจเป็นเพราะปูนดังกล่าวได้ใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งและอาจทำให้ปูนเสื่อมสภาพด้วยการเปลี่ยนสีไปบ้าง หรืออาจเป็นเพราะมีการใช้ปูนซีเมนต์เทาผสมก็เป็นได้

ผลการทดสอบปูนฉาบโบราณอยุธยาพบว่ามีสีขาวถึงสีน้ำตาลอ่อนมาก (ดูตารางที่ 4) ซึ่งถ้าแบ่งตามยุคของโบราณสถานพบว่า ปูนฉาบในโบราณสถานยุคกลางที่ทดสอบเป็นสีน้ำตาลอ่อนมากทั้งหมด ซึ่งมีสีที่คล้ายคลึงกับปูนสอ

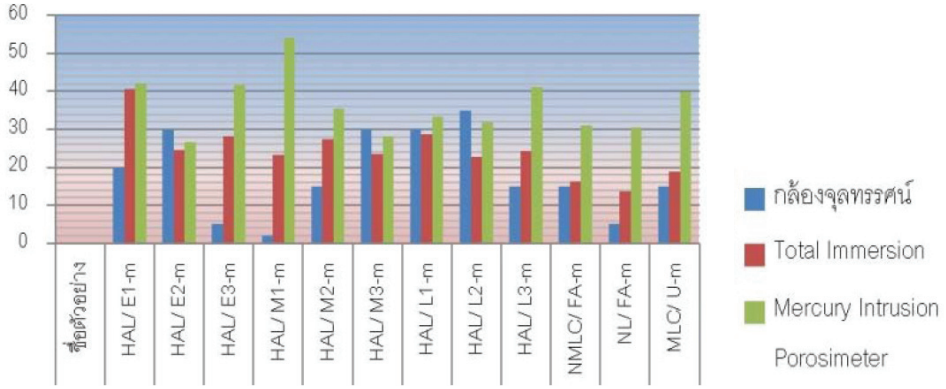
ของโบราณสถานยุคเดียวกันเช่นกัน ในขณะที่ปูนฉาบของโบราณสถานในยุคต้นและยุคปลายส่วนใหญ่จะมีสีขาว แต่ทั้งนี้จากการที่ผลการทดสอบปูนฉาบในโบราณสถานของยุคต้นและยุคปลายมิได้เป็นไปในทางเดียวกันทั้งหมด จึงเป็นการยากที่จะสรุปสีของปูนฉาบโบราณในยุคนั้นๆ ได้

ผลการทดสอบปูนสมัยใหม่แสดงให้เห็นว่า ปูนฉาบที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมาของอุโบสถของวัดแคมีน้ำตาลอ่อนมาก ไม่ใช่สีขาวเช่นเดียวกับปูนสอสมัยใหม่ที่ทำจากปูนขาวหมักผสมปูนซีเมนต์ขาว แต่ก็มิได้มีเฉดสีเทาเหมือนดังปูนสอที่ใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานแห่งเดียวกัน ซึ่งการที่ปูนฉาบที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมานี้มีสีที่เข้มกว่าปูนขาวหมัก และเกิดปรากฏการณ์เดียวกันกับปูนสอหรือปูนฉาบโบราณจากโบราณสถานบางแห่ง จึงอาจเป็นไปได้ว่าปูนดังกล่าวได้ใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งและอาจเสื่อมสภาพด้วยการเปลี่ยนสีไปบ้าง แต่การที่ปูนฉาบสมัยใหม่ที่ใช้ในการอนุรักษ์นี้ไม่เป็นสีเทา อาจทำให้สันนิษฐานได้ว่าปูนฉาบนี้ไม่มีการผสมปูนซีเมนต์เทา หรือมีการผสมในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณส่วนผสมอื่นๆ

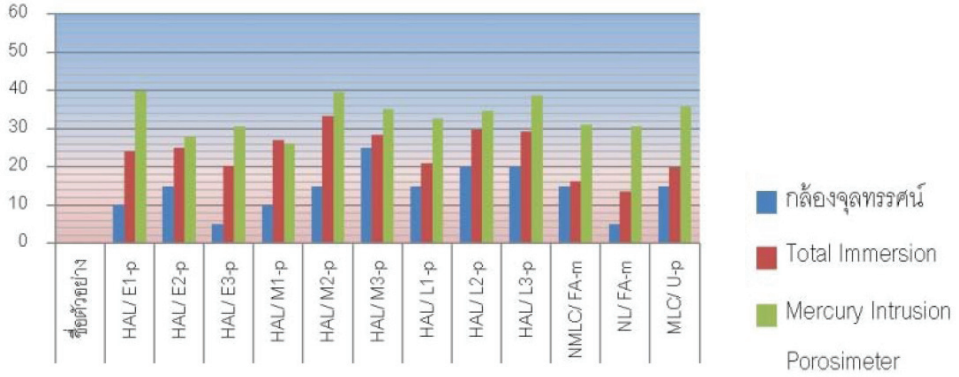
อย่างไรก็ดี เนื่องจากในการศึกษานี้มีการทดสอบโบราณสถานเพียงยุคละ 3 แห่ง หรือรวมทั้งหมดเป็น 9 แห่ง ทำให้ข้อมูลเรื่องสีของปูนที่ได้นี้อาจไม่เพียงพอจะนำมาใช้เป็นข้อสรุปของสีของปูนสอหรือปูนฉาบของแต่ละยุค หรือนำมาใช้เป็นตัวแทนของสีของปูนที่ใช้ในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมของอยุธยาในอดีตได้ ดังจะเห็นได้จากการที่ปูนตัวอย่างที่นำมาทดสอบแม้เพียง 9 แห่ง ยังแสดงความหลายหลายของสีอย่างเห็นได้ชัด และการใช้งานที่ผ่านเป็นระยะเวลาหลายร้อยปีนั้น ก็อาจมีการเสื่อมสภาพจนสูญเสียองค์ประกอบดั้งเดิมไปบ้าง หรือมีฝุ่น เขม่า จุลินทรีย์ รวมทั้งสิ่งสกปรกอื่นๆ มาทำให้สีของปูนโบราณเปลี่ยนไป สีที่ทดสอบจึงอาจเป็นเพียงสีปัจจุบันของปูนโบราณเท่านั้น แต่ไม่ใช่สีดั้งเดิมของปูนโบราณ ดังนั้นผู้วิจัยขอแนะนำว่า ผลการทดสอบเรื่องสีของปูนในการศึกษานี้ควรถูกนำไปใช้ประโยชน์ในแง่ของการเป็นฐานข้อมูล เพื่อใช้ในการจัดหาวัสดุที่มีสีที่ใกล้เคียงและเหมาะสมมาใช้ในการอนุรักษ์ปูนของโบราณสถานที่ได้ทดสอบแล้วต่อไป มากกว่าจะนำมาหาข้อสรุปให้ได้ว่าสีของปูนที่ใช้ในโบราณสถานของพระนครศรีอยุธยาทั้งหมดคือสีใด

• ความเป็นรูพรุน ค่าร้อยละความเป็นรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุน (Porosity and Pore Size Distribution)

แผนภาพที่ 4: การเปรียบเทียบร้อยละความเป็นรูพรุนของปูนสอ



แผนภาพที่ 4: การเปรียบเทียบร้อยละความเป็นรูพรุนของปูนฉาบ



เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจนับความเป็นรูพรุนพบว่า ร้อยละของความเป็นรูพรุนของปูนสอโบราณมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 35 (ดูแผนภาพที่ 4) แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันในเชิงภาพรวมของปูนในโบราณสถานแต่ละยุค พบว่าปูนสอในโบราณสถานยุคปลายมีร้อยละความเป็นรูพรุนมากที่สุด (ปูนสอของเจดีย์ทองแดง วัดมเหยงคณ์ มีความพรุน 35% ซึ่งถือว่ามีความพรุนมากที่สุดในปูนทั้งหมดที่นำมาศึกษา) ในขณะที่ปูนสอของโบราณสถานในยุคกลางมีความพรุนโดยรวมน้อยที่สุด (ปูนสอของวิหารหลวง วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ มีความพรุนเพียง 1-2%) และเมื่อนำปูนสอโบราณมาเปรียบเทียบกับปูนสมัยใหม่ พบว่าปูนสอโบราณโดยรวมแล้วจะมีความพรุนที่มากกว่า โดยปูนสมัยใหม่ที่ผสมจากปูนขาวหมักล้วน (NL/FA-m) มีความพรุนเพียง 5% ในขณะที่เมื่อนำซีเมนต์ขาวมาผสมในอัตราส่วน 1:8 (ปูนซีเมนต์ขาว:ปูนขาว) ทำให้ปูนสอที่ได้ (NMLC/FA-m) มีความพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 15% ซึ่งมีค่าร้อยละความเป็นรูพรุนที่ใกล้เคียงกับปูนขาวผสมซีเมนต์ที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา ณ อุโบสถของวัดแค (MLC/U-m) แต่เมื่อทดสอบปูนสอทั้งหมดด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) กลับพบว่าปูนสมัยใหม่ดังกล่าวมีค่าร้อยละความเป็นรูพรุนใกล้เคียงกับปูนโบราณจากโบราณสถานบางแห่ง โดยเฉพาะโบราณสถานในยุคปลาย กล่าวคือปูนหล่อใหม่จากสูตรของกรมศิลปากรทั้งแบบที่ใช้ปูนขาวล้วน (NL/FA-m) และแบบที่ผสมปูนซีเมนต์ขาว (NMLC/FA-m) ต่างก็มีความพรุนอยู่ที่ประมาณ 30-31% ซึ่งใกล้เคียงกับปูนสอโบราณที่ได้มาจากอุโบสถของวัดบรมพุทธาราม (HAL/L1-m) และเจดีย์ทองแดงของวัดมเหยงคณ์ (HAL/L2-m) ในขณะที่ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการอนุรักษ์อุโบสถของวัดแค (MLC/U-m) มีความพรุนใกล้เคียงกับปูนโบราณของเสาโบสถ์ วัดพระนอน (HAL/E3-m) และเมรุรายหมายเลข C4 ของวัดไชยวัฒนาราม (HAL/L3-m) ซึ่งความพรุนของปูนสอโบราณอยุธยาโดยรวมเมื่อทดสอบด้วยเครื่อง MIP มีตั้งแต่ประมาณ 26% ไปจนถึง 54% โดยปูนที่มีความพรุนน้อยที่สุดอยู่ที่เจดีย์ช้างล้อม ณ วัดมเหยงคณ์ (HAL/E2-m) ส่วนปูนสอที่มีความพรุนมากที่สุดคือปูนจากวิหารหลวงวัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ (HAL/M1-m) และเป็นที่น่าสังเกตว่า ผลการทดสอบปูนสอจากวิหารหลวงวัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์และด้วยเครื่อง MIP นั้นมีค่าร้อยละความเป็นรูพรุนที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นจึงอาจ

เป็นการยากที่จะสรุปค่าร้อยละความพรุนของปูนอยุธยาในขั้นนี้ และจำเป็นต้องนำผลการทดสอบด้วยวิธีการแช่น้ำให้อิ่มมาพิจารณาร่วมด้วยต่อไป

การทดสอบค่าความพรุนของปูนด้วยวิธีการแช่ก้อนปูนในน้ำให้อิ่มน้ำ (total immersion) พบว่าปูนสอโบราณของอยุธยามีความพรุนประมาณ 22-40% ซึ่งปูนสอโบราณส่วนใหญ่มีความพรุนที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 25±3% โดยไม่จำเป็นต้องจำแนกตามยุคของโบราณสถาน และมีความพรุนมากกว่าปูนสมัยใหม่ที่มีความพรุนน้อยกว่า 20% ทั้งสามชนิด ซึ่งถ้าพิจารณาโดยใช้ค่าเฉลี่ยเป็นเกณฑ์จะพบว่า ปูนสอที่พบในโบราณสถานยุคต้นอาจมีความพรุนโดยเฉลี่ยมากที่สุด แต่ในความเป็นจริงแล้ว ปูนในโบราณสถานแต่ละแห่งต่างก็มีส่วนผสมและคุณสมบัติเฉพาะตัว และจากข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการทดสอบนี้ ก็ไม่สามารถนำไปสู่การสรุปอัตลักษณ์ของปูนในแต่ละยุคอย่างชัดเจนได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงไม่นำส่วนผสมหรือคุณสมบัติของปูนแต่ละยุคมาคำนวณค่าเฉลี่ยของแต่ละยุค แต่เลือกใช้วิธีพิจารณาจากภาพโดยรวมแทน โดยสรุปเป็นช่วงของค่าความพรุนของปูนโบราณและปูนสมัยใหม่ที่นำมาทดสอบแทนการคำนวณหาค่าเฉลี่ย

รูพรุนที่พบในปูนโบราณที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ประมาณ 0.007 ไมครอน ($7x10^{-3}$ ไมโครเมตร หรือ 0.000007 มิลลิเมตร) จนถึง 3.75x102 ไมครอน (0.375 มิลลิเมตร) โดยที่ปูนส่วนใหญ่จะมีช่วงของขนาดของรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่า ปูนจากโบราณสถานแต่ละแห่งมีความแตกต่างกัน กล่าวคือจะมีขนาดของรูพรุนที่ปรากฏเป็นส่วนใหญ่ (ค่าฐานนิยม) ที่ไม่เท่ากัน และส่งผลให้มีความสามารถในการส่งผ่านน้ำหรือความชื้นระหว่างสภาพแวดล้อมและเนื้อปูนของแต่ละแห่งที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงว่าปูนสอจากปรางค์ประธานวัดมหาธาตุมีขนาดของรูพรุนส่วนใหญ่ประมาณ 0.03 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ที่ใหญ่ที่สุด ในขณะที่ปูนสอจากเมรุรายหมายเลข C4 ในวัดไชยวัฒนารามมีรูพรุนส่วนใหญ่ที่มีขนาดเล็กที่สุด คือประมาณ 0.05 ไมครอน (0.00005 มิลลิเมตร) ซึ่งอาจส่งผลให้ปูนสอของเมรุรายหมายเลข C4 ในวัดไชยวัฒนารามอาจสามารถส่งผ่านน้ำหรือความชื้นด้วยกระบวนการคาปิลลารีได้มากกว่า และอาจส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเพราะน้ำและความชื้นมากกว่าด้วย

สำหรับปูนฉาบ เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจนับความเป็นรูพรุนพบว่า ร้อยละของความเป็นรูพรุนของปูนฉาบโบราณมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 25 (ดูแผนภาพที่ 5) ซึ่งเมื่อเทียบกับความพรุนของปูนสอโบราณแล้วจะพบว่า ปูนฉาบโบราณมีความพรุนน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปูนฉาบโบราณด้วยกันพบว่า ปูนฉาบของปรางค์ประธานวัดวรเชตเทพบำรุงซึ่งเป็นโบราณสถานยุคกลางมีความพรุนมากที่สุด ในขณะที่ปูนฉาบของเสาโบสถ์ของวัดพระนอนซึ่งเป็นโบราณสถานยุคต้นมีความพรุนน้อยที่สุด แต่เมื่อนำปูนฉาบโบราณมาเปรียบเทียบกับปูนสมัยใหม่พบว่า ปูนฉาบโบราณโดยรวมแล้วจะมีความพรุนที่มากกว่า โดยปูนสมัยใหม่ที่ผสมจากปูนขาวหมักล้วน (NL/FA-m) มีความพรุนเพียง 5% ในขณะที่เมื่อนำซีเมนต์ขาวมาผสมในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ขาว 1 ส่วนต่อปูนขาว 8 ส่วน (ซึ่งกรมศิลปากรก็ใช้ปูนสูตรนี้เมื่อจำเป็นต้องฉาบด้วย แต่อาจมีการเปลี่ยนขนาดของทรายที่ผสมให้มีความละเอียดขึ้น) ทำให้ปูนที่ได้ (NMLC/FA-m) มีความพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 15% ซึ่งมีค่าร้อยละความเป็นรูพรุนที่ใกล้เคียงกับปูนขาวผสมซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนฉาบในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา ณ อุโบสถของวัดแค (MLC/U-p) และเมื่อทดสอบปูนฉาบทั้งหมดด้วยเครื่อง MIP พบว่าปูนดังกล่าวมีค่าร้อยละความเป็นรูพรุนใกล้เคียงกับปูนโบราณจากโบราณสถานบางแห่ง กล่าวคือปูนหล่อใหม่จากสูตรของกรมศิลปากรทั้งแบบที่ใช้ปูนขาวล้วน (NL/FA-m) และแบบที่ผสมปูนซีเมนต์ขาว (NMLC/FA-m) ต่างก็มีความพรุนอยู่ที่ประมาณ 30-31% ซึ่ง

ใกล้เคียงกับปูนฉาบโบราณที่ได้มาจากเสาอุโบสถของวัดพระนอน (HAL/E3-p) และค่อนข้างใกล้เคียงกับปูนฉาบที่อุโบสถของวัดบรมพุทธาราม (HAL/L1-p) ในขณะที่ปูนฉาบที่ใช้ในการอนุรักษ์อุโบสถของวัดแค (MLC/U-p) มีความพรุนใกล้เคียงกับปูนโบราณของปรางค์ประธานของวัดวรเชตเทพบำรุง (HAL/M3-p) ซึ่งความพรุนของปูนฉาบโบราณอยุธยาโดยรวมเมื่อทดสอบด้วยเครื่อง MIP มีตั้งแต่ประมาณ 26% ไปจนถึง ประมาณ 40% โดยปูนฉาบที่มีความพรุนน้อยที่สุดอยู่ที่วิหารหลวง วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ (HAL/M1-p) ส่วนปูนฉาบที่มีความพรุนมากที่สุดคือปูนจากปรางค์ประธาน ณ วัดมหาธาตุ (HAL/E1-p)

การทดสอบค่าความพรุนของปูนด้วยวิธีแช่ในน้ำให้อิ่มน้ำพบว่าปูนฉาบโบราณของอยุธยามีความพรุนประมาณ 20-33% ซึ่งมีความพรุนน้อยกว่าปูนสอของโบราณสถานเดียวกัน โดยที่ปูนฉาบของเสาอุโบสถของวัดพระนอน (HAL/E3-p) และอุโบสถของวัดบรมพุทธารามมีความพรุนน้อยที่สุด ในขณะที่ปูนฉาบของวิหารพระป่าเลไลย์ วัดพระศรีสรรเพ็ชญ์ (HAL/M2-p) มีความพรุนมากที่สุด

รูพรุนที่พบในปูนฉาบโบราณที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ประมาณ 7x10-3 ไมครอน (7x 10^{-3} ไมโครเมตรหรือ 0.000007 มิลลิเมตร) จนถึง 3.97x102 ไมครอน (0.397 มิลลิเมตร) โดยที่ปูนส่วนใหญ่จะมีช่วงของขนาดของรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกันกับปูนสอโบราณ คือเมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่าปูนฉาบจากโบราณสถานแต่ละแห่งมีความแตกต่างกัน กล่าวคือจะมีขนาดของรูพรุนที่ปรากฏเป็นส่วนใหญ่ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงว่าปูนฉาบโบราณมิได้มีรูพรุนส่วนใหญ่ที่มีขนาดเล็กกว่าปูนสอจากโบราณสถานเดียวกันเสมอไป เช่น ปูนฉาบจากปรางค์ประธานวัดมหาธาตุมีขนาดของรูพรุนส่วนใหญ่ประมาณ 0.3 ไมครอน (0.0003 มิลลิเมตร) ซึ่งเมื่อเทียบกับขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ของปูนสอที่โบราณสถานเดียวกันจะพบว่ามีขนาดเล็กกว่าถึง 100 เท่าและเป็นไปตามข้อสันนิษฐานในเบื้องต้น แต่ปูนฉาบของโบราณสถานยุคกลางทั้งหมดกลับมีขนาดของรูพรุนส่วนใหญ่ (ค่าฐานนิยม) ใหญ่กว่าของปูนสอของโบราณสถานแห่งเดียวกัน ส่วนปูนฉาบจากเจดีย์ทองแดงวัด มเหยงคณ์มีรูพรุนส่วนใหญ่ที่มีขนาดเล็กที่สุด คือประมาณ 0.04 ไมครอน (0.00004 มิลลิเมตร) และนั่นอาจทำให้ปูนฉาบของเจดีย์ดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเพราะน้ำและความชื้นมากกว่าปูนฉาบของโบราณสถานอื่นได้

จากการทดสอบวัดความเป็นรูพรุนของปูนสอและปูนฉาบอยุธยาทั้งการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทั้งด้วยเครื่องวัดความเป็นรูพรุนด้วยปรอท (MIP) ซึ่งสามารถบ่งชี้ค่าร้อยละความเป็นรูพรุน พร้อมทั้งบอกค่าการกระจายตัวของรูพรุนและขนาดของรูพรุน และทั้งจากการคำนวณจากการทดสอบด้วยวิธีการแช่น้ำจนอิ่มน้ำ พบว่าความเป็นรูพรุนของปูนโบราณอยุธยามีความหลากหลาย โดยค่าร้อยละความพรุนของปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานแต่ละยุคนั้น มิได้มีความชัดเจนจนเป็นลักษณะเฉพาะของยุคได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการศึกษาความพรุนของปูนโบราณนั้นจึงไม่จำเป็นต้องจำแนกตามยุคของโบราณสถาน เพราะปูนในโบราณสถานแต่ละแห่งต่างก็มีส่วนผสมและคุณสมบัติเฉพาะตัว และจากที่ได้อภิปรายไว้ว่าข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการทดสอบนี้ไม่สามารถนำไปสู่การสรุปอัตลักษณ์ของปูนในแต่ละยุคอย่างชัดเจนได้ ดังนั้นจึงไม่ควรนำค่าร้อยละความเป็นรูพรุนหรือขนาดของรูพรุนของปูนจากแต่ละโบราณสถานของแต่ละยุคมาคำนวณค่าเฉลี่ย แต่ควรใช้วิธีพิจารณาและนำเสนอผลการศึกษาเป็นภาพรวมแทน โดยสามารถสรุปเป็นช่วงของค่าความพรุนและขนาดของรูพรุนของปูนโบราณและปูนสมัยใหม่ที่นำมาทดสอบแทนการคำนวณหาค่าเฉลี่ย

การที่ค่าร้อยละความเป็นรูพรุนที่ทดสอบด้วยวิธีหรือเครื่องมือที่ต่างกันแล้วให้ค่าที่ต่างกันนั้น ในการศึกษานี้ยังมิอาจสรุปได้ว่าวิธีใดหรือเครื่องมือใดสามารถให้ผลการทดสอบที่แม่นยำหรือเที่ยงตรงที่สุด เพราะผลการทดสอบที่ได้เป็นเพียงการประเมินค่าร้อยละความเป็นรูพรุนของปูนสอและปูนฉาบจากโบราณสถานแต่ละแห่งเมื่อใช้เครื่องมือ

แต่ละชนิดเท่านั้น ในการนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในการเปรียบเทียบคุณสมบัติความเป็นรูพรุนของปูนโบราณกับของปูนหรือวัสดุทดแทน ก่อนตัดสินใจนำปูนหรือวัสดุทดแทนมาใช้ในการอนุรักษ์ต่อไปนั้น จึงควรระบุเครื่องมือที่ใช้วัดด้วยทุกครั้ง

อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาจากปริมาณตัวอย่างปูนที่นำมาทดสอบแล้วจะเห็นได้ว่า การทดสอบด้วยวิธีแช่น้ำให้อิ่มใช้ปริมาณตัวอย่างปูนมากที่สุด ทำให้ได้เนื้อปูนเพื่อนำมาเป็นตัวแทนในการทดสอบที่มากที่สุด ซึ่งถึงแม้ว่าจะใช้หลักการเดียวกับการใช้เครื่อง MIP กล่าวคือการแช่น้ำให้อิ่มใช้น้ำเข้าไปแทนที่รูพรุนที่น้ำเข้าถึงได้ทั้งหมด แล้วจึงวัดปริมาตรของน้ำเพื่อให้ได้ปริมาตรของรูพรุน ส่วนการใช้เครื่อง MIP เป็นการใช้ไอปรอทแทนการใช้น้ำเข้าไปแทนที่รูพรุน (Watsantachad, 2018: 70, 72) แต่เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีแช่น้ำให้อิ่มน้ำมีปริมาณวัสดุที่ถูกทดสอบที่มากกว่า ทำให้ค่าที่วัดได้ค่อนข้างมีความน่าเชื่อถือมากกว่า ส่วนการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้นเป็นการทดสอบบนพื้นผิวของปูนซึ่งเป็นมิติทางราบเพียงมิติเดียว ทำให้ค่าที่วัดได้อาจมีความน่าเชื่อถือน้อยที่สุด ทั้งนี้การพิจารณาเลือกวิธีที่จะใช้ทดสอบความเป็นรูพรุนของปูนหรือวัสดุโบราณอื่นๆ อาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของข้อมูลเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านอื่น ๆ เช่น จำนวนและปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบที่หามาได้ ผลการทดสอบที่ต้องการ ความพร้อมด้านงบประมาณ เวลา และเครื่องมือที่จะใช้ทดสอบ (ibid: 100-101) เพราะวิธีการทดสอบแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อเสียหรือข้อได้เปรียบและเสียเปรียบที่แตกต่างกัน การทดสอบด้วยวิธีแช่น้ำให้อิ่มน้ำนั้น ถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีที่ให้ค่าความเป็นรูพรุนที่ค่อนข้างน่าเชื่อถือดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่เป็นวิธีที่ทำลายวัสดุดั้งเดิมมากที่สุด เพราะต้องนำตัวอย่างปริมาณพอสมควรออกจากโบราณสถานมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ และใช้ระยะเวลาในการทดสอบนานที่สุดแต่ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด ในขณะที่การทดสอบด้วยเครื่อง MIP และกล้องจุลทรรศน์ต้องการปริมาณวัสดุและเวลาในการทดสอบที่น้อยกว่ามาก แต่อาจได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือได้น้อยกว่าและใช้งบประมาณในการทดสอบที่มากกว่า โดยเฉพาะการทดสอบด้วยเครื่อง MIP ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบขั้นสูงและมีราคาค่าบริการที่สูงกว่าวิธีอื่น แต่ได้ผลคุ้มค่าในแง่ของการได้ข้อมูลเรื่องขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนด้วย ในขณะที่การทดสอบด้วยวิธีแช่น้ำให้อิ่มน้ำไม่สามารถให้ข้อมูลในส่วนนี้ได้โดยตรง

• ความสามารถในการดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารี (Capillary Rise)

จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีของปูนอยุธยาพบว่า ทั้งปูนสอและปูนฉาบจากโบราณสถานทั้ง 3 ยุคมีความสามารถในการดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีที่หลากหลาย และไม่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละยุค ปูนสอโบราณมีอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยจากอัตราการดูดซึมน้ำในแต่ละช่วงเวลาในระยะเวลาที่แช่น้ำทั้งหมด 3 ชั่วโมงอยู่ที่ 0.18 ถึง 0.40 เซนติเมตร/นาที ในขณะที่ปูนสมัยใหม่ทั้งสองชนิดมีค่าเฉลี่ยอัตราการดูดซึมที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับปูนสอโบราณอยุธยา โดยที่ปูนซีเมนต์ผสมกับปูนขาวและทราย (NMLC/FA-m) มีอัตราการดูดซึมด้วยกระบวนการคาปิลลารีเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมของปูนโบราณ และในระยะเวลา 3 ชั่วโมงก็คาดว่าจะดูดซึมน้ำเข้าสู่วัสดุได้สูงที่สุดด้วย แต่ปูนสมัยใหม่ที่เป็นปูนขาวผสมทรายกลับดูดซึมน้ำขึ้นสู่วัสดุในระดับความสูงที่ใกล้เคียงกับปูนโบราณ

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาจากอัตราการดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีที่สูงสุดที่สุดของปูนโบราณทั้งหมดแล้ว พบว่าปูนสอโบราณอยุธยามีการดูดซึมน้ำขึ้นไปสูงตั้งแต่ 1.5 ถึง 2.7 เซนติเมตรตั้งแต่นาทีแรกของการแช่น้ำ และโดยปกติปูนสอแต่ละชั้นในโบราณสถานของอยุธยามีความหนาไม่เกิน 1 นิ้ว (หรือ 2.5 เซนติเมตร) นั่น

หมายความว่าหากมีน้ำขังที่บริเวณกำแพงโบราณสถานอยุธยาบางแห่ง และด้านนอกของปูนสอโบราณนั้นถูกแช่ในน้ำนานเพียง 1 นาที ปูนสอชั้นที่สัมผัสน้ำขังก็อาจจะชุ่มไปด้วยน้ำ และกลายเป็นแหล่งน้ำที่ส่งต่อให้กับอิฐโบราณที่อยู่ข้างเคียงได้ และหากน้ำที่ขังหรือท่วมนั้นไม่ได้รับการระบายออกไปภายใน 5 นาที (ปูนสอโบราณทุกแห่งดูดซึมน้ำมากกว่าหรือเท่ากับ 2.5 เซนติเมตรภายใน 5 นาทีแรกของการแช่น้ำ) ปูนสอชั้นต่างๆ ที่สัมผัสหรือแช่น้ำอยู่ก็คงชุ่มไปด้วยน้ำที่ซึมเข้าสู่เนื้อปูนผ่านท่อรูพรุนเล็กๆ ในเนื้อปูนที่เรียกว่าท่อคาปิลลารี และปูนนั้นได้ดูดซึมน้ำขึ้นไปจนสุดความหนาของแต่ละชั้นด้วยกระบวนการคาปิลลารีแล้ว

ปูนฉาบโบราณมีอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยจากอัตราการดูดซึมน้ำในแต่ละช่วงเวลาในระยะเวลาที่แช่น้ำทั้งหมด 3 ชั่วโมงอยู่ที่ 0.10 ถึง 0.31 เซนติเมตร/นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีอัตราที่ต่ำกว่าอัตราการดูดซึมน้ำของปูนสอ แต่พบว่าระดับน้ำสูงสุดที่เข้าสู่เนื้อปูนกลับใกล้เคียงกับปูนสอ ในขณะที่ปูนสมัยใหม่ทั้งสองชนิดมีค่าเฉลี่ยอัตราการดูดซึมที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับปูนฉาบโบราณอยุธยา โดยที่ปูนซีเมนต์ผสมกับปูนขาวและทราย (NMLC/FA-m) และปูนสมัยใหม่ที่เป็นปูนขาวผสมทราย (NL/FA-m) มีอัตราการดูดซึมด้วยกระบวนการคาปิลลารีเฉลี่ยสูงกว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมของปูนโบราณ

หากพิจารณาจากอัตราการดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีที่สูงสุดที่สุดของปูนฉาบโบราณทั้งหมดแล้วพบว่าปูนฉาบโบราณอยุธยามีการดูดซึมน้ำขึ้นไปสูงตั้งแต่ 1.5 ถึง 2.7 เซนติเมตรตั้งแต่นาทีแรกของการแช่ และเมื่อผ่านการแช่น้ำ 3 ชั่วโมง น้ำอาจถูกดูดซึมเข้าสู่ปูนฉาบโบราณโดยเฉพาะปูนฉาบที่มาจากโบราณสถานยุคกลางได้สูงกว่า 10 เซนติเมตร นั่นหมายความว่าหากมีน้ำขังที่บริเวณกำแพงโบราณสถานอยุธยาบางแห่ง และด้านล่างของปูนฉาบโบราณนั้นถูกแช่ในน้ำนานประมาณ 3 ชั่วโมง ปูนฉาบที่อยู่เหนือจากระดับน้ำที่ท่วมขังขึ้นไปอาจเปียกชื้น และอาจกลายเป็นแหล่งน้ำที่ส่งต่อให้กับอิฐและปูนสอโบราณที่ปูนฉาบนั้นสัมผัสอยู่ได้

• ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Capacity หรือ WAC)

ปูนสอโบราณของอยุธยามีความสามารถในการดูดซึมน้ำประมาณ 9 ถึง 29 โดยปูนสอของโบราณสถานยุคต้นส่วนใหญ่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากกว่ายุคอื่น ปูนสอจากปรางค์ประธาน วัดมหาธาตุ มีความสามารถในการดูดซึมน้ำสูงเกือบถึง 30 ในขณะที่ปูนสอจากโบราณสถานยุคกลางมีความสามารถในการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด และค่าความสามารถการดูดซึมน้ำค่อนข้างเกาะกลุ่มอยู่ในระหว่าง 15 ถึง 20 เช่นเดียวกับปูนสอจากโบราณสถานยุคปลายที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำประมาณ 20 อย่างไรก็ดีมีโบราณสถานยุคต้นและปลายยุคละหนึ่งแห่ง ที่ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำไม่ใกล้เคียงกับโบราณสถานแห่งอื่น ๆ ในยุคเดียวกัน คือตัวอย่างปูนสอที่เก็บมาจากเจดีย์ช้างล้อม (ยุคต้น) และเจดีย์ทองแดง (ยุคปลาย) ของ วัดมเหยงคณ์ ทำให้เกิดข้อสงสัยว่าโบราณสถานดังกล่าวมีการใช้ปูนสอที่ต่างจากโบราณสถานอื่น ๆ ในยุคเดียวกัน หรือในความเป็นจริงแล้วปูนสอที่ใช้ในโบราณสถานต่าง ๆ ของพระนครศรีอยุธยานั้นมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ และไม่สามารถแบ่งออกเป็นยุคได้เช่นเดียวกับการแบ่งยุคทางศิลปกรรมและสถาปัตยกรรม แต่เนื่องจากจำนวนโบราณสถานที่ถูกเก็บตัวอย่างปูนมาทดสอบในการศึกษาครั้งนี้มีจำนวนไม่มากพอที่จะนำไปสู่ข้อสรุปนี้ได้ ข้อสงสัยนี้จึงจำเป็นต้องได้รับการศึกษาค้นคว้าต่อไป

ปูนฉาบโบราณมีความสามารถในการดูดซึมน้ำประมาณ 15 ถึง 19 ซึ่งเป็นช่วงที่แคบกว่าปูนสอโบราณ รวมทั้งค่าสูงสุดยังเป็นค่าที่ต่ำกว่า WAC ของปูนสอโบราณด้วย แสดงว่าปูนฉาบโบราณอยุธยามีความสามารถในการดูดซึมน้ำไม่หลากหลายเท่าปูนสอโบราณ และค่อนข้างดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่าปูนสอโบราณเล็กน้อย โดยถ้าพิจารณายุคของ

โบราณสถานจะเห็นว่าไม่สามารถแบ่งกลุ่มของปูนฉาบโบราณของอยุธยาตามยุคทางศิลปกรรมสถาปัตยกรรมหรือการปกครองได้

ถ้าพิจารณาคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำของปูนสมัยใหม่จะเห็นได้ว่า ปูนสมัยใหม่ไม่ว่าจะเป็นปูนขาวหมักล้วน ปูนขาวหมักผสมปูนซีเมนต์ขาว และปูนสอผสมซีเมนต์ที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา ต่างก็มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำกว่าปูนสอโบราณส่วนใหญ่ แต่ไปใกล้เคียงกับปูนสอโบราณของเจดีย์ช้างล้อม วัดมเหยงคณ์ ซึ่งการที่ปูนสมัยใหม่มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำต่ำ อาจถือเป็นข้อได้เปรียบที่ทำให้มีความเสี่ยงในการเสื่อมสภาพเพราะน้ำและความชื้นน้อย แต่ในขณะเดียวกันหากนำมาใช้ร่วมกับปูนโบราณ อาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพของปูนโบราณที่มากขึ้นได้ เพราะเมื่อวัสดุสองชนิดที่มีคุณสมบัติต่างกันถูกใช้งานร่วมกันในบริเวณเดียวกัน มีความเป็นได้ที่วัสดุที่อ่อนแอกว่าหรือมีคุณสมบัติที่ด้อยกว่าจะเสื่อมสภาพในปริมาณที่มากกว่าและ/หรือด้วยอัตราที่เร็วกว่า ซึ่งหมายความว่าถ้าปูนสมัยใหม่มีคุณสมบัติที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพน้อยกว่า ปูนที่จะเสื่อมสภาพก่อนจะกลายเป็นปูนโบราณ แต่ทั้งนี้ เราอาจพิจารณานำปูนสมัยใหม่ที่มีข้อดีในเรื่องการดูดซึมน้ำต่ำนี้ ไปใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานในบริเวณที่ต้องการลดการดูดซึมน้ำได้ อย่างไรก็ตาม ก็ควรมีการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโบราณข้างเคียงรวมไปถึงปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของปูนสมัยใหม่นี้ ก่อนการตัดสินใจนำปูนสมัยใหม่ไปใช้ทุกครั้ง ส่วนปูนฉาบสมัยใหม่ที่ใช้ในการอนุรักษ์อุโบสถวัดแคนั้น จะเห็นได้ว่ามีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับปูนฉาบโบราณอื่น ๆ จึงไปสอดคล้องกับผลการทดสอบสีที่ผ่านมาที่ไม่มีสีเทาของปูนซีเมนต์เทาปรากฏอยู่ จึงมีความเป็นไปได้เป็นอย่างมาก ที่ปูนฉาบที่ใช้ในการอนุรักษ์อุโบสถวัดแคนั้นจะไม่ได้มีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ด้วย หรือถ้ามีก็อาจจะมีในปริมาณที่น้อยมากจนไม่ส่งผลให้คุณสมบัติในการดูดซึมน้ำของปูนขาวเปลี่ยนแปลงจนเป็นที่สังเกตได้

• ความสามารถในการระเหยน้ำออก (Water Evaporation Capacity)

การทดสอบการระเหยน้ำของปูนอยุธยาพบว่า ปูนสอส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 89 (ปูนจากโบราณสถานที่ทดสอบ 8 แห่งจากทั้งหมด 9 แห่ง) เมื่ออยู่ในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิ 40±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะสามารถเปลี่ยนสภาพจากสภาวะที่อิ่มน้ำ (มีความชื้น 99.5-100%) ไปสู่สภาวะที่แห้งมากกว่า 80% ได้ และปูนสอจากโบราณสถานดังกล่าวจะเข้าสู่สภาวะแห้งสนิท (มีความชื้นประมาณไม่เกินร้อยละ 0.5) ได้ภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งปูนสอของโบราณสถานในยุคต้นทั้ง 3 แห่งมีคุณสมบัติในการระเหยน้ำที่เหมือนกัน ในขณะที่ปูนสอจากโบราณสถานในยุคหลังจากนั้นบางแห่งมีคุณสมบัติในการระเหยที่ช้ากว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับปูนสมัยใหม่แล้วพบว่า ปูนสมัยใหม่ของกรมศิลปากรทั้ง 2 สูตรมีคุณสมบัติในการระเหยน้ำออกที่ใกล้เคียงกับปูนโบราณของอยุธยา โดยพบว่าปูนขาวล้วนผสมทรายมีคุณสมบัติในการระเหยน้ำที่ดีที่สุด คือสามารถแห้งสนิทได้ภายใน 24 ชั่วโมง ซึ่งน่าจะถือเป็นข้อดีข้อหนึ่งของปูนสมัยใหม่สูตรนี้

เมื่อพิจารณาจากอัตราการระเหยน้ำของปูนสออยุธยาจะพบว่า ปูนสอโบราณมีอัตราการระเหยน้ำโดยเฉลี่ยประมาณ 0.02 ถึง 0.03 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิว 1 ตารางเซนติเมตร โดยปูนสอจากโบราณสถานแต่ละยุคมีอัตราการระเหยที่ใกล้เคียงกัน และไม่ได้มีคุณสมบัติข้อนี้ที่เป็นลักษณะเฉพาะของยุคใดยุคหนึ่ง เช่นเดียวกับอัตราการระเหยน้ำสูงสุด ที่ไม่ได้แสดงลักษณะเฉพาะของยุคใดยุคหนึ่ง กล่าวคือปูนสอจากโบราณสถานทุกยุคมีอัตราการระเหยน้ำสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.04 ถึง 0.32 มิลลิลิตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร แต่จะเห็นได้ว่าช่วงของอัตราการระเหยน้ำสูงสุด (ซึ่งก็คือการระเหยของน้ำออกจากปูนในช่วง 5 ถึง 10 นาทีแรก) ของปูนสอโบราณค่อนข้างกว้าง แสดงให้เห็นว่าปูน

จากโบราณสถานแต่ละแห่งอาจจะมีคุณสมบัติที่ส่งผลต่อการระเหยน้ำในช่วงแรกที่ต่างกัน ซึ่งค่าของอัตราการระเหยน้ำสูงสุดนี้ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของอัตราการระเหยตลอดระยะเวลาของกระบวนการทำให้ปูนแห้งสูงเกินไป กล่าวคือปูนบางแห่งอาจมีอัตราการระเหยสูงสุดที่สูง ทำให้มีอัตราการระเหยเฉลี่ยที่สูงกว่าปูนแห่งอื่น แต่กลับใช้เวลาในการระเหยน้ำออกจนแห้งสนิทนานกว่า นั่นเป็นเพราะปูนดังกล่าวระเหยน้ำออกเร็วมากในช่วง 5 ถึง 10 นาทีแรก แต่หลังจากนั้นกลับระเหยด้วยอัตราที่ต่ำมาก จนทำให้ต้องใช้เวลาในการระเหยน้ำออกที่นาน เช่น ปูนจากเจดีย์ทองแดง วัดมเหยงคณ์ (HAL/L2-m) มีอัตราการระเหยน้ำที่สูงถึง 0.32 มิลลิลิตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตรในช่วง 5 นาทีแรก แต่หลังจาก 4 ชั่วโมงผ่านไป อัตราการระเหยน้ำกลับลดลงจนเกือบถึงศูนย์ ทั้งๆ ที่ยังมีน้ำที่ค้างอยู่ในก้อนปูนและต้องการระเหยออกอีกกว่า 60% และทำให้ต้องใช้เวลาถึง 7 วันในการระเหยน้ำออกจนแห้งสนิท ซึ่งปรากฏการณ์นี้นำไปสู่ข้อสรุปหนึ่งว่า การคาดการณ์ระยะเวลาในการแห้งของปูนโบราณนั้น ควรพิจารณาจากอัตราการระเหยของน้ำที่เป็นค่าคงที่หรือค่าฐานนิยมของอัตราการระเหยทั้งหมดตลอดระยะเวลาตั้งแต่ปูนเปียกจนกระทั่งแห้ง มากกว่าการพิจารณาโดยใช้อัตราการระเหยสูงสุดหรืออัตราการระเหยเฉลี่ย และนอกจากคุณสมบัติของปูนแต่ละแห่งจะมีผลต่ออัตราการระเหยน้ำแล้ว อัตราการระเหยน้ำออกของปูนอาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อมด้วย ดังนั้นในการคาดการณ์ดังกล่าวจึงจำเป็นต้องศึกษาและพิจารณาข้อมูลสภาวะและปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อการระเหยน้ำออกจากปูนโบราณควบคู่กันไป

ปูนฉาบส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 67 (ปูนจากโบราณสถานที่ทดสอบ 6 แห่งจากทั้งหมด 9 แห่ง) เมื่ออยู่ในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิ 40±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะสามารถเปลี่ยนสภาพจากสภาวะที่อิ่มน้ำ (มีความชื้น 99.5-100%) ไปสู่สภาวะที่แห้งมากกว่า 80% ได้ และปูนฉาบจากโบราณสถานในกลุ่มนี้ 3 แห่ง (หรือ 50% จะเข้าสู่สภาวะแห้งสนิท (มีความชื้นประมาณไม่เกินร้อยละ 0.5) ได้ภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง แต่อีก 3 แห่งที่เหลือต้องใช้เวลาถึง 72 ถึง 120 ชั่วโมงจึงจะแห้งสนิท และเป็นที่น่าสังเกตว่าปูนฉาบจากโบราณสถานอีกกลุ่มหนึ่ง (จำนวน 3 แห่ง) ใช้เวลา 48 ชั่วโมงจึงจะเข้าสู่สภาวะที่แห้งมากกว่า 80% แต่กลับแห้งสนิทได้ภายใน 72 ชั่วโมงเช่นเดียวกับปูนจากโบราณสถานกลุ่มแรก 2 แห่ง ดังนั้นระยะเวลาในช่วงที่ปูนระเหยน้ำออกไป 80% แรกได้เร็วหรือช้านั้น อาจไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ว่าปูนนั้นๆ จะใช้เวลาอีกนานเพียงใดจึงจะเข้าสู่สภาวะแห้งสนิท

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปูนฉาบแต่ละยุคไม่มีคุณสมบัติการระเหยน้ำออกที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของยุค ดังจะเห็นได้ว่าปูนฉาบทั้ง 3 ยุคต่างก็มีทั้งปูนชนิดที่แห้งสนิทภายใน 48 ชั่วโมงและภายใน 72 ชั่วโมง แต่เป็นที่น่าสังเกตว่ามีปูนฉาบจากโบราณสถานยุคปลาย 1 แห่ง คือที่เมรุรายหมายเลข C4 วัดไชยวัฒนาราม ที่ใช้เวลาในการระเหยน้ำออกจนแห้งสนิทถึง 120 ชั่วโมง (5 วัน) ซึ่งคงต้องศึกษาต่อไปว่าเพราะเหตุใดจึงทำให้ปูนฉาบจากโบราณสถานแห่งนี้แห้งช้ากว่าปูนฉาบจากโบราณสถานอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับปูนสมัยใหม่แล้วพบว่า ปูนสมัยใหม่ของกรมศิลปากรทั้ง 2 สูตรมีคุณสมบัติในการระเหยน้ำออกที่ดีกว่าหรือใกล้เคียงกับปูนฉาบโบราณของอยุธยาส่วนใหญ่ ดังที่ได้อภิปรายไปแล้ว ผลการทดสอบแสดงว่าปูนขาวล้วนผสมทรายมีคุณสมบัติในการระเหยน้ำที่ดีที่สุด คือสามารถแห้งสนิทได้ภายใน 24 ชั่วโมง ซึ่งน่าจะถือเป็นข้อดีข้อหนึ่งของปูนสมัยใหม่สูตรนี้ ที่อาจนำมาพิจารณาปรับใช้ในกรณีที่จำเป็นต้องฉาบโบราณสถานทดแทนปูนฉาบโบราณที่สูญหายไป แต่ทั้งนี้ก็ยังจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของปูนนี้ ว่าเข้ากันได้กับคุณสมบัติของวัสดุโบราณที่ต้องสัมผัสหรือทำงานร่วมกันกับปูนนี้หรือไม่อย่างไร ก่อนที่จะมั่นใจว่าปูนสูตรนี้เหมาะสมที่จะใช้ในการอนุรักษ์อย่างแน่นอน

ปูนฉาบโบราณมีอัตราการระเหยน้ำโดยเฉลี่ยประมาณ 0.01 ถึง 0.03 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิว 1 ตารางเซนติเมตร โดยเกินครึ่งหนึ่งมีอัตราการระเหยน้ำเฉลี่ยอยู่ที่ 0.02 มิลลิลิตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร และปูนฉาบจากโบราณสถานแต่ละยุคต่างก็มีอัตราการระเหยที่ใกล้เคียงกัน จนไม่ได้แสดงลักษณะเฉพาะของยุคใดยุคหนึ่ง ส่วนอัตราการระเหยน้ำสูงสุด (ซึ่งก็คือการระเหยของน้ำออกจากปูนในช่วง 5 ถึง 10 นาทีแรก) ของปูนฉาบจากโบราณสถานส่วนใหญ่ของทุกยุคอยู่ที่ประมาณ 0.04 ถึง 0.19 มิลลิลิตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ค่อนข้างกว้าง แสดงให้เห็นว่าปูนฉาบจากโบราณสถานแต่ละแห่งอาจจะมีคุณสมบัติที่ส่งผลต่อการระเหยน้ำในช่วงแรกที่ต่างกัน และต่างจากปูนสอของโบราณสถานแห่งเดียวกันด้วย (โดยภาพรวมแล้วปูนสอโบราณมีอัตราการระเหยน้ำออกที่สูงกว่าปูนฉาบโบราณ) และเช่นเดียวกับปูนสอ ค่าของอัตราการระเหยน้ำสูงสุด อาจส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของอัตราการระเหยตลอดกระบวนการที่ปูนแห้งสูงกว่าหรือเท่ากับปูนจากแหล่งอื่นที่มีอัตราการระเหยในระยะแรกที่ไม่สูงมาก แต่ระเหยด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ไปตลอดกระบวนการ และอาจจะแห้งสนิทได้เร็วกว่าปูนที่มีอัตราการระเหยในระยะแรกที่สูงกว่าด้วย เช่น ปูนฉาบจากเจดีย์ทองแดง วัดมเหยงคณ์ (HAL/L2-p หรือในที่นี้ขอย่อว่า L2) เมื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยสูงสุดในช่วงแรกกับปูนฉาบจากโบราณสถานในยุคเดียวกัน คือจากอุโบสถ วัดบรมพุทธาราม (HAL/L1-p หรือย่อว่า L1) พบว่าปูนฉาบทั้งสองแห่งมีอัตราการระเหยเฉลี่ยเท่ากัน ทั้งๆ ที่ปูนฉาบ L2 มีอัตราการระเหยน้ำในช่วง 5 นาทีแรกที่สูงกว่า คือ 0.19 มิลลิลิตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร ในขณะที่ปูนฉาบ L1 มีอัตราการระเหยช่วงแรกเพียง 0.08 มิลลิลิตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าปูนฉาบ L1 มีอัตราการระเหยที่ค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งน้ำระเหยออกไปมากกว่าร้อยละ 80 และแห้งสนิทในที่สุด แต่ปูนฉาบ L2 อัตราการระเหยลดลงอย่างรวดเร็วหลังจาก 5 นาทีผ่านไป และแทบหยุดการระเหยเมื่อเวลาผ่านไป 6.5 ชั่วโมง จึงส่งผลให้ปูนฉาบ L2 ใช้เวลาในการแห้ง 80% และแห้งสนิทที่นานกว่าปูนฉาบ L1 ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นการยืนยันข้อสรุปที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การคาดการณ์ระยะเวลาในการแห้งของปูนโบราณนั้น ควรพิจารณาจากอัตราการระเหยของน้ำที่เป็นค่าคงที่หรือค่าฐานนิยมของอัตราการระเหยทั้งหมด ตลอดระยะเวลาตั้งแต่ปูนเปียกจนกระทั่งแห้ง มากกว่าใช้อัตราการระเหยสูงสุดหรืออัตราการระเหยเฉลี่ยเป็นเกณฑ์

• ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability)

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำหรือการยอมให้ความชื้นระเหยผ่านของปูนอยุธยาพบว่า ปูนโบราณของอยุธยามีการยอมให้ความชื้นระเหยผ่านได้พอสมควร ซึ่งปูนสอมีค่าความสามารถในการส่งผ่านหรือระบายความชื้น (WVT) ตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.06 โดยยอมให้ความชื้นที่อยู่ด้านในของปูนสอระบายออกสู่ภายนอกด้วยอัตราประมาณ 0.001 – 0.002 กรัมต่อชั่วโมงต่อพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตร ในขณะที่ปูนฉาบโบราณมีความสามารถในการยอมให้ความชื้นระเหยผ่านตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 ด้วยอัตราประมาณ 0.001 ถึง 0.002 กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร (ดูตารางที่ 5 และ 6)

ตารางที่ 5: การจัดลำดับการระบายความชื้นของปูนสออยุธยา

#	ชื่อตัวอย่าง	ค่าคงที่ของอัตราการระบายความชื้น (กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร)
23	MLC/U-m	0.000
1	HAL/E1-m	-0.001
3	HAL/E2-m	-0.001
7	HAL/M1-m	-0.001
9	HAL/M2-m	-0.001
13	HAL/L1-m	-0.001
17	HAL/L3-m	-0.001
22	NL/FA-m	-0.001
5	HAL/E3-m	-0.002
11	HAL/M3-m	-0.002
15	HAL/L2-m	-0.002
21	NMLC/FA-m	-0.003

ตารางที่ 6: การจัดลำดับการระบายความชื้นของปูนฉาบอยุธยา

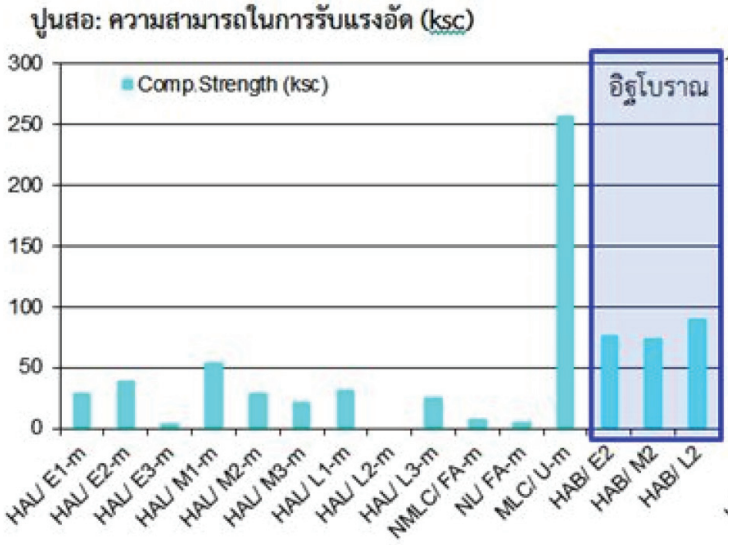
#	ชื่อตัวอย่าง	ค่าคงที่ของอัตราการระบายความชื้น (กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร)
12	HAL/M3-p	-0.0005
2	HAL/E1-p	-0.001
4	HAL/E2-p	-0.001
6	HAL/E3-p	-0.001
8	HAL/M1-p	-0.001
10	HAL/M2-p	-0.001
14	HAL/L1-p	-0.001
18	HAL/L3-p	-0.001
22	NL/FA-m	-0.001
24	MLC/U-p	-0.001
16	HAL/L2-p	-0.002
21	NMLC/FA-m	-0.003

หากพิจารณาปูนสอโบราณตามยุคของโบราณสถานจะพบว่า ปูนสอจากโบราณสถานของทุกยุคส่วนใหญ่ยอมให้ความชื้นระเหยผ่านในอัตราที่ใกล้เคียงกันมาก ต่างกันเพียงในระดับที่น้อยกว่า 1 มิลลิกรัม เช่นเดียวกับปูนฉาบจากโบราณสถานของอยุธยาทุกยุค เว้นแค่ปูนฉาบจากปรางค์ประธานของวัดวรเชตเทพบำรุงซึ่งเป็นโบราณสถานยุคกลาง ยอมให้ความชื้นระบายออกในอัตราที่ต่ำกว่าปูนฉาบโบราณจากแหล่งอื่นๆ ส่วนปูนสมัยใหม่ทั้ง 3 สูตรกลับมีอัตราการยอมให้ความชื้นระเหยผ่านที่ต่างกัน โดยปูนสมัยใหม่สูตรปูนขาว:ทรายเท่ากับ 1:3 มีอัตราการระเหยที่ไม่แตกต่างจากปูนสอและปูนฉาบโบราณเลย แต่ปูนสมัยใหม่ที่ใช้ซีเมนต์ขาวมาผสมด้วยในอัตราส่วน 1:8:24 มีอัตราการยอมให้ความชื้นระบายออกสูงกว่าปูนสอ และปูนฉาบโบราณ ซึ่งในกรณีนี้ก็ไม่น่าจะสร้างปัญหาใดเมื่อนำมาใช้ร่วมกับปูนโบราณ เพราะการที่น้ำหรือความชื้นมาระเหยที่ปูนสมัยใหม่มากกว่า และอาจทำให้บริเวณนั้นเสื่อมสภาพมากกว่า ซึ่งเป็นผลดีต่อปูนโบราณ เพราะอาจทำให้อัตราและปริมาณการเสื่อมสภาพของปูนโบราณลดลง แต่ปูนสอที่ใช้ในการอนุรักษ์อุโบสถของวัดแคที่ผ่านมา มีอัตราการยอมให้ความชื้นระบายออกเกือบเป็นศูนย์ กล่าวคือแทบจะไม่ยอมให้ความชื้นระเหยผ่านได้เลย ซึ่งคุณสมบัตินี้ค่อนข้างเป็นอันตรายถ้าถูกนำมาใช้ร่วมกับปูนและอิฐโบราณในโบราณสถาน ส่วนผลการทดสอบปูนสมัยใหม่ที่ใช้ฉาบอุโบสถของวัดแคในการอนุรักษ์ที่ผ่านมานั้นพบว่า มีคุณสมบัติในการระเหยน้ำออกที่ใกล้เคียงกับปูนฉาบโบราณ ซึ่งในกรณีนี้อาจสรุปได้ว่าปูนฉาบที่ใช้ในการอนุรักษ์อุโบสถของวัดแคไม่น่าจะสร้างปัญหาเดียวกับปูนสอที่นำมาใช้ในการสอแทน (repointing) ณ โบราณสถานเดียวกัน

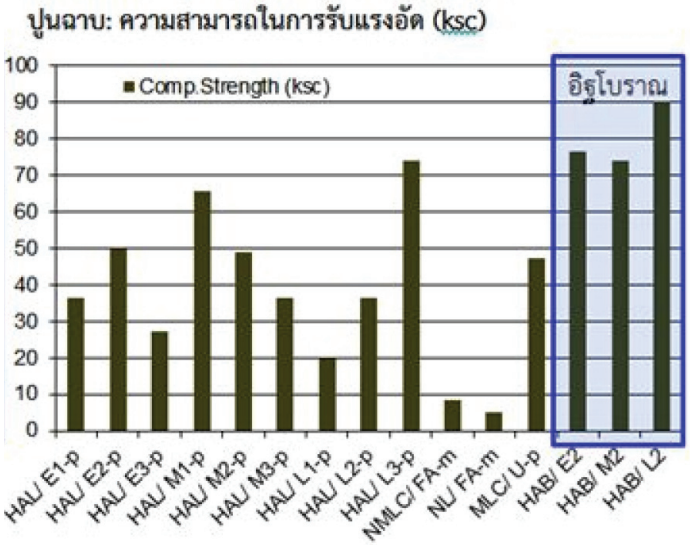
9.2 คุณสมบัติทางเชิงกล (Mechanical Properties)

• **ความสามารถในการรับแรงอัด (Compressive strength)**

แผนภาพที่ 6: การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดของปูนสอโบราณ ปูนสอสมัยใหม่ และอิฐโบราณ



แผนภาพที่ 7: การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดของปูนฉาบโบราณ ปูนฉาบสมัยใหม่ และอิฐโบราณ



ความสามารถในการรับแรงอัดของปูนอยุธยาถูกทดสอบด้วยกระบวนการตามมาตรฐาน ASTM C170: Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone โดยได้ประยุกต์ขนาดของตัวอย่างจากลูกบาศก์ขนาด 2x2x2 นิ้ว ให้เหลือเพียง 1x1x1 นิ้วตามขนาดของตัวอย่างปูนโบราณที่เก็บได้ โดยในเบื้องต้นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบคือเครื่อง Digital Concrete Compression Machine ASTM Standard รุ่น TTR-080G ของบริษัท Soil Testing Siam แต่จากการทดสอบพบว่าเมื่อใช้เครื่องกดก้อนปูนตัวอย่างให้แตกเพื่อวัดค่าความสามารถในการรับแรงอัดนั้น ก้อนปูนทั้งหมดได้แตกก่อนที่เครื่องจะสามารถอ่านค่าแรงกดได้ ทำให้การทดสอบนี้ไม่ประสบผลสำเร็จ แสดงว่าความสามารถในการรับแรงอัดของปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานอยุธยามีค่าที่ต่ำกว่าคอนกรีตมากเกินกว่าจะใช้เครื่องทดสอบคอนกรีตมาทดสอบได้ แต่ในภายหลังเมื่อเปลี่ยนมาใช้เครื่องทดสอบกำลังของดิน จึงสามารถทดสอบและอ่านค่าแรงกดได้

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปูนสอของโบราณสถานอยุธยามีความสามารถในการรับแรงอัดที่หลากหลายตั้งแต่ประมาณ 3 ถึง 79 ksc (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 29 ksc และมีฐานนิยมอยู่ที่ช่วง 3-10 และ 23-30 ksc หากเปรียบเทียบปูนสอที่ได้มาจากโบราณสถานแต่ละยุคจะพบว่า ปูนในยุคกลาง (HAL/M) มีความแข็งแรงโดยเฉลี่ยมากที่สุดคือประมาณ 34 ksc ในขณะที่ปูนจากยุคต้น (HAL/E) มีความแข็งแรงน้อยที่สุดคือประมาณ 24 ksc อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าปูนที่ทดสอบทั้งหมดนั้นแต่ละก้อนก็มีความแข็งแรงที่ไม่เท่ากัน และปูนแต่ละก้อนในแต่ละยุคก็ไม่ได้แสดงความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกันด้วย จึงอาจเป็นอีกข้อมูลที่สนับสนุนข้อสรุปว่าปูนสอที่ใช้ในโบราณสถานอยุธยาในแต่ละยุคไม่ได้มีคุณสมบัติที่แบ่งแยกเป็นยุคได้เหมือนกับการแบ่งยุคทางศิลปะและสถาปัตยกรรม ส่วนปูนสมัยใหม่ที่เป็นปูนขาวผสมทราย (NL/FA-m) มีค่าความแข็งแรงประมาณ 5 ksc แต่เมื่อมีปูนซีเมนต์ขาวเป็นส่วนผสมด้วย (NMLC/FA-m) จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 8 ksc ซึ่งจะเห็นว่าปูนทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถในการรับแรงอัดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปูนโบราณ แต่อาจเป็นไปได้ว่าในขณะที่ก้อนปูนมีอายุเพียง 28 วัน กระบวนการคาร์บอเนชั่นของปูนหล่อใหม่นี้ยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ยังไม่แสดงความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปูนสอที่ใช้ในการอนุรักษ์อุโบสถวัดแค (MLC/U-m) ที่สันนิษฐานว่าเกิดคาร์บอเนชั่นอย่างสมบูรณ์ พบว่าปูนชนิดหลังมีความแข็งแรงมากกว่ามาก คือมีความสามารถในการรับแรงอัดโดยเฉลี่ยได้ถึง 257 ksc ซึ่งมากกว่าความแข็งแรงของปูนโบราณถึงประมาณ 9 เท่า และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของอิฐโบราณที่ได้มาจากโบราณสถานในแต่ละยุค ที่มีค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัดโดยเฉลี่ยคือ 80 ksc (โดยที่อิฐของยุคปลายมีความแข็งแรงที่สุดคือ 90 ksc ส่วนอิฐของยุคต้นและยุคกลางมีความแข็งแรงค่อนข้างใกล้เคียงกันคือประมาณ 74-76 ksc) พบว่าอิฐโบราณมีความแข็งแรงน้อยกว่าปูนที่เคยใช้ในการอนุรักษ์ถึง 3 เท่า ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาจากความสามารถในการรับแรงอัดแล้ว ปูนสอที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมาของกรมศิลปากรไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานในอยุธยาอีกต่อไป เนื่องจากมีความแข็งแรงมากกว่าอิฐและปูนโบราณมาก ซึ่งเมื่อนำมาใช้ร่วมกันแล้วอาจทำให้อิฐและปูนโบราณร้าวหรือแตกหักได้ง่ายขึ้น (Watsantachad, 2006-2007: 240)

ปูนฉาบโบราณของอยุธยามีความสามารถในการรับแรงอัดได้ตั้งแต่ 17-77 ksc โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 44 ksc และมีฐานนิยมอยู่ในช่วง 23-29 ksc ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปูนฉาบของแต่ละยุคพบว่าปูนฉาบของยุคกลางและยุคปลายมีค่าความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 43-44 ksc และแข็งแรงกว่าปูนฉาบของยุคต้นประมาณ 5-6 ksc

แต่โดยสรุปแล้วปูนฉาบของแต่ละยุคก็ไม่ได้มีค่าความแข็งแรงที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะยุค แต่ค่อนข้างจะมีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกัน (ดูแผนภาพที่ 7)และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปูนฉาบที่กรมศิลปากรเคยใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา (MLC/U-p) พบว่ามีค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ผนวกกับค่าการยอมให้ความชื้นผ่านที่ใกล้เคียงกับปูนฉาบโบราณ ทำให้ปูนฉาบที่กรมศิลปากรเคยใช้ในการบูรณะมาในอดีตไม่น่าจะสร้างปัญหาในการนำมาใช้ร่วมกับอิฐหรือปูนโบราณในโบราณสถานอยุธยา

10. สรุปผลการวิจัยและตอบคำถามวิจัย

จากคำถามวิจัยที่ว่าคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก คืออะไรนั้น การที่จะตอบคำถามนี้ได้จำเป็นต้องตอบคำถามย่อยที่กำหนดไว้ 2 ข้อก่อน ดังนี้

คำถามย่อยข้อที่ 1: *คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบดั้งเดิมที่พบในโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาคืออะไร ปูนสอและปูนฉาบโบราณในโบราณสถานของอยุธยาในแต่ละยุคสมัยเป็นอย่างไร เหมือนหรือแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร*

จากการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบโบราณของอยุธยา พบว่าปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานของอยุธยาในแต่ละแหล่งมีคุณสมบัติที่หลากหลายและไม่สามารถแบ่งเป็นกลุ่มหรือยุคได้อย่างชัดเจน จึงสมควรนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นฐานข้อมูลของโบราณสถานแต่ละแหล่ง หรือนำไปรวบรวมเพื่อสร้างฐานข้อมูลปูนในโบราณสถานของอยุธยาในอนาคต มากกว่าที่จะสรุปได้ในขั้นนี้ว่าปูนในโบราณสถานในแต่ละยุคเป็นอย่างไร แต่หากนำปูนที่ได้จากโบราณสถานทั้ง 9 แหล่งที่ศึกษามาวิเคราะห์รวมกันในฐานะกลุ่มตัวอย่างของปูนโบราณอยุธยาอาจนำมาซึ่งข้อสรุปคุณสมบัติของปูนในโบราณสถานของอยุธยาได้ดังนี้

• ปูนสอในโบราณสถานของอยุธยา

ปูนสอในโบราณสถานของอยุธยาในปัจจุบันมีคุณสมบัติทางแร่ธาตุหรือเคมีที่ประกอบไปด้วยแคลไซต์ (หรือแคลเซียมคาร์บอเนต) และควอตซ์ (หรือซิลิกอนไดออกไซด์) เป็นหลัก จัดเป็นปูนขาวชนิดแคลเซียมสูง (Historic Scotland, 1995) โดยมีเหล็กออกไซด์ร่วมอยู่ด้วยเสมอ และอาจมีเฟลด์สปาร์ ไมกา หรือเศษหินปะปนอยู่ด้วย มีควอตซ์หรือเม็ดทรายที่ทำหน้าที่เป็นมวลรวมหลัก มีขนาดและรูปร่างที่หลากหลายตั้งแต่ 0.25 ถึง 5 มิลลิเมตร โดยที่ส่วนใหญ่จะมีขนาด 0.5 ถึง 1.25 มิลลิเมตร มีรูปร่างตั้งแต่เหลี่ยมไปถึงกลม อัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ (หรือปูน) : ควอตซ์ (หรือทราย) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 10:1 ไปถึง 1:1.5 และหากนับแร่ธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบเป็นมวลรวมด้วย อัตราส่วนระหว่างปูน : มวลรวมจะมีค่าระหว่าง 10:2 ถึง 1:2.3 มีการผสมเส้นใยที่อาจเป็นของพืชหรือสัตว์ลงในเนื้อปูนสอที่ใช้ในโบราณสถานในช่วงหลัง รวมทั้งพบผงอิฐ อิฐหักหรือเศษกระเบื้องดินเผา และก้อนปูนขาว (lime lump) อยู่ในเนื้อปูนสอ ปูนมีสีขาวถึงสีน้ำตาลอ่อนมาก

ร้อยละของความเป็นรูพรุนของปูนสอโบราณของอยุธยามีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 35 ถ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แต่มีค่าตั้งแต่ประมาณร้อยละ 26 ถึง 54 ถ้าใช้เครื่อง MIP ในการตรวจสอบ และมีค่าความพรุนร้อยละ 22-40 ถ้าทดสอบโดยใช้วิธีแช่น้ำให้อิ่มตัว ซึ่งส่วนใหญ่จะมีความพรุนประมาณร้อยละ 25 โดยรูพรุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.007 ไมครอนถึง 0.375 มิลลิเมตร โดยการกระจายตัวของรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง

0.05 ถึง 33 ไมครอน ซึ่งขนาดของรูพรุนนี้ส่งผลให้เกิดการดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีโดยเฉลี่ย 1.8 ถึง 4 มิลลิเมตร/นาที และด้วยขนาดของรูพรุนและร้อยละความพรุนที่กล่าวมาทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำจนอิ่มตัว (WAC) ที่ 9 ถึง 29 ซึ่งก้อนปูนขนาด 2.5x2.5x2.5 เซนติเมตรสามารถอิ่มน้ำได้ภายในเวลาตั้งแต่ 24 ถึง 168 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.17 ถึง 1.25 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ลูกบาศก์เซนติเมตร และระเหยน้ำจนแห้งสนิทภายในเวลา 48 ถึง 168 ชั่วโมง โดยมีอัตราการระเหยน้ำโดยเฉลี่ย 0.02 ถึง 0.03 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร และยอมให้ความชื้นที่อยู่ด้านในของปูนสอระบายออกสู่ภายนอกด้วยอัตราประมาณ 0.001 – 0.002 กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร

ปูนสอในโบราณสถานของอยุธยามีความสามารถในการรับแรงอัดได้ประมาณ 3 ถึง 79 ksc (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 29 ksc และส่วนใหญ่มีความแข็งแรงต้านทานแรงอัดอยู่ในช่วง 3-10 และ 23-30 ksc ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของอิฐโบราณที่มีค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัดโดยเฉลี่ยคือ 80 ksc ก็นับว่าเป็นความแข็งแรงที่เหมาะสมแล้วที่ถูกนำมาใช้ในการก่ออิฐ

• ปูนฉาบในโบราณสถานของอยุธยา

ปูนฉาบในโบราณสถานของอยุธยามีคุณสมบัติทางแร่ธาตุหรือเคมีที่ประกอบไปด้วยแคลไซต์และควอตซ์เป็นหลัก จัดเป็นปูนขาวชนิดแคลเซียมสูงเช่นเดียวกัน โดยมีเหล็กออกไซด์ร่วมอยู่ด้วยเสมอ และอาจมีเฟลด์สปาร์ ไมกา หรือเศษหินปะปนอยู่ด้วย มีควอตซ์หรือเม็ดทรายที่ทำหน้าที่เป็นมวลรวมหลัก มีขนาดและรูปร่างที่หลากหลายตั้งแต่ 0.1 ถึง 5 มิลลิเมตร และพบขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตรมากที่สุด อัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ (หรือปูน) : ควอตซ์ (หรือทราย) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 10:3 ถึง 1:1.8 และอัตราส่วนของปูน : มวลรวมคือ 10:7 ถึง 1:3 มีการผสมเส้นใยที่อาจเป็นของพืชหรือสัตว์ลงในเนื้อปูนฉาบที่ใช้ในโบราณสถานทุกสมัย รวมทั้งยังพบผงอิฐ อิฐหักหรือเศษกระเบื้องดินเผา และก้อนปูนขาวอยู่ในเนื้อปูนฉาบด้วย และเนื้อปูนมีสีขาวถึงสีน้ำตาลอ่อนมากเช่นเดียวกับปูนสอ

ปูนฉาบโบราณของอยุธยามีค่าร้อยละของความเป็นรูพรุนของอยู่ระหว่าง 5 ถึง 25 ถ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แต่มีค่าตั้งแต่ประมาณร้อยละ 26 ถึง 40 ถ้าใช้เครื่อง MIP ในการตรวจสอบ และมีค่าความพรุนร้อยละ 20 ถึง 33 ถ้าทดสอบโดยใช้วิธีแช่น้ำให้อิ่ม โดยรูพรุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.007 ไมครอนถึง 0.397 มิลลิเมตร โดยการกระจายตัวของรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.04 ถึง 10.84 ไมครอน โดยที่ปูนฉาบตัวอย่างส่วนใหญ่จะมีรูพรุนขนาดประมาณ 0.2 ถึง 0.3 ไมครอน ส่งผลให้เกิดการดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีโดยเฉลี่ย 1 ถึง 3 มิลลิเมตร/นาที และสามารถดูดน้ำขึ้นไปได้มากกว่า 10 เซนติเมตรภายใน 3 ชั่วโมง มีความสามารถในการดูดซึมน้ำจนอิ่มตัว (WAC) ที่ 15 ถึง 19 ซึ่งก้อนปูนขนาด 2.5x2.5x2.5 เซนติเมตรสามารถอิ่มน้ำได้ภายในเวลาตั้งแต่ 8 ถึง 168 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.6 ถึง 0.9 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ลูกบาศก์เซนติเมตร และระเหยน้ำจนแห้งสนิทภายในเวลา 48 ถึง 120 ชั่วโมง โดยมีอัตราการระเหยน้ำโดยเฉลี่ย 0.01 ถึง 0.03 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร และยอมให้ความชื้นที่อยู่ด้านในของปูนฉาบระบายออกสู่ภายนอกด้วยอัตรา 0.0005 ถึง 0.002 กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร

ปูนฉาบในโบราณสถานของอยุธยามีความสามารถในการรับแรงอัดได้ประมาณ 17 ถึง 77 ksc โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 44 ksc และส่วนใหญ่จะมีความแข็งแรงต้านทานแรงอัดอยู่ในช่วง 23 ถึง 29 ksc ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของอิฐโบราณที่มีค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัดโดยเฉลี่ยคือ 80 ksc และค่าความแข็ง

แรงของปูนสอโบราณ ก็นับว่าเป็นความแข็งแรงที่เหมาะสมแล้วที่ถูกนำมาใช้ในการฉาบกำแพงหรือผนังก่ออิฐ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปูนโบราณที่นำมาใช้ทดสอบนี้ ได้ผ่านการใช้งานบนโบราณสถานมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน และต้องผ่านการเสื่อมสภาพจากสภาพแวดล้อมมาไม่มากก็น้อย โดยเฉพาะอาจมีการสึกกร่อน หลุดร่อน ผุพังของธรณีวัตถุและอินทรียสารไปตามกาลเวลา และอาจเสื่อมสภาพเพราะปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุทกภัย จุลชีพ หรือเกลือ ฯลฯ ผลจากการทดสอบคุณสมบัติจึงเป็นคุณสมบัติของปูนที่อาจเสื่อมสภาพแล้ว ดังนั้นตัวอย่างปูนที่มาจากโบราณสถานเพื่อนำมาทดสอบนี้ จึงอาจทำหน้าที่เป็นเพียงตัวแทนของปูนโบราณอยุธยาที่เสื่อมสภาพแล้วเท่านั้น แต่ไม่อาจเป็นตัวแทนของปูนดั้งเดิมของอยุธยาได้ และผลการทดสอบหรือข้อสรุปในงานวิจัยนี้จึงเป็นเพียงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปูนโบราณอยุธยาในสภาพ ณ ปัจจุบันเท่านั้น ซึ่งอาจมิใช่คุณสมบัติหรือองค์ประกอบของปูนอยุธยาดั้งเดิม

คำถามย่อยข้อที่ 2: *ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขาว และปูนขาวหมักแบบโบราณ ที่กรมศิลปากรได้นำมาใช้ในการบูรณะโบราณสถานพระนครศรีอยุธยาในอดีตและปัจจุบันนั้น มีคุณสมบัติแตกต่างจากคุณสมบัติของปูนโบราณดั้งเดิมหรือไม่ อย่างไร และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการบูรณะโบราณสถานของนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาหรือไม่ เพราะเหตุใด*

• ปูนสอสมัยใหม่ที่ทำมาจากปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ขาว (NMLC)

ปูนสอสมัยใหม่ NMLC มีคุณสมบัติทางแร่ธาตุหรือเคมีที่ประกอบไปด้วยแคลไซต์ (หรือแคลเซียมคาร์บอเนต) และควอตซ์ (หรือซิลิกอนไดออกไซด์) เป็นหลัก โดยมีเหล็กออกไซด์และเฟลด์สปาร์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย โดยที่ไม่มีไมกาหรือเศษหินปะปนอยู่เลย โดยควอตซ์หรือเม็ดทรายรูปร่างตั้งแต่เหลี่ยมถึงกลมมีขนาดตั้งแต่ 0.5 ถึง 3.5 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นมวลรวมหลัก มีอัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ (หรือปูน) : ควอตซ์ (หรือทราย) 1:1.1 และอัตราส่วนระหว่างปูน : มวลรวม 1:1.2-2.3 เนื้อปูนมีสีขาว

ร้อยละของความเป็นรูพรุนของปูนสอ NMLC คือ 15 ถ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ หรือประมาณร้อยละ 31 เมื่อใช้เครื่อง MIP ในการตรวจสอบ แต่เมื่อทดสอบโดยใช้วิธีแช่น้ำให้อิ่มจะมีค่าความพรุนร้อยละ 16 โดยรูพรุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.007 ไมครอนถึง 0.387 มิลลิเมตร และการกระจายตัวของรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ที่ขนาด 16.35 ไมครอน ซึ่งสามารถดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 4.6 มิลลิเมตร/นาที ขนาดของรูพรุนและร้อยละความพรุนที่กล่าวมาทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำจนอิ่มตัว (WAC) ที่ 13.68 ซึ่งก้อนปูนขนาด 2.5x2.5x2.5 เซนติเมตรสามารถอิ่มน้ำได้ภายในเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.66 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และระเหยน้ำจนแห้งสนิทภายในเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีอัตราการระเหยน้ำโดยเฉลี่ย 0.02 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร และยอมให้ความชื้นที่อยู่ด้านในของปูนสอระบายออกสู่ภายนอกด้วยอัตราประมาณ 0.003 กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร

ปูนสอ NMLC มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ประมาณ 7 ถึง 10 ksc (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 8 ksc

• ปูนสอสมัยใหม่ที่ทำมาจากปูนขาวหมัก (NL)

ปูนสอสมัยใหม่ NL มีคุณสมบัติทางแร่ธาตุหรือเคมีที่ประกอบไปด้วยแคลไซต์ (หรือแคลเซียมคาร์บอเนต) และควอตซ์ (หรือซิลิกอนไดออกไซด์) เป็นหลัก โดยมีเหล็กออกไซด์และเฟลด์สปาร์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย แต่ไม่มี

ไมกาหรือเศษหินปะปนอยู่ ควอตซ์หรือเม็ดทรายทำหน้าที่เป็นมวลรวมหลัก มีขนาดตั้งแต่ 0.25 ถึง 2 มิลลิเมตร มีรูปร่างตั้งแต่เหลี่ยมไปถึงกลม อัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ (หรือปูน) : ควอตซ์ (หรือทราย) 5:3 แต่หากนับแร่ธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบเป็นมวลรวมด้วย จะมีอัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ : มวลรวมทั้งหมดคือ 1:1 เนื้อปูนมีสีขาว

ร้อยละของความเป็นรูพรุนของปูนสอ NL คือ 5 ถ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ หรือประมาณร้อยละ 30.5 เมื่อใช้เครื่อง MIP ในการตรวจสอบ แต่เมื่อทดสอบโดยใช้วิธีแช่น้ำให้อิ่มตัวจะมีค่าความพรุนร้อยละ 12.68 โดยรูพรุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.007 ไมครอนถึง 0.387 มิลลิเมตร โดยการกระจายตัวของรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ที่ขนาด 0.353 ไมครอน สามารถดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 3.8 มิลลิเมตร/นาที มีความสามารถในการดูดซึมน้ำจนอิ่มตัว (WAC) ที่ 12.49 ซึ่งก้อนปูนขนาด 2.5x2.5x2.5 เซนติเมตรสามารถอิ่มน้ำได้ภายในเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.55 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ลูกบาศก์เซนติเมตร และระเหยน้ำจนแห้งสนิทภายในเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีอัตราการระเหยน้ำโดยเฉลี่ย 0.01 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร และยอมให้ความชื้นที่อยู่ด้านในของปูนสอระบายออกสู่ภายนอกด้วยอัตราประมาณ 0.001 กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ประมาณ 4 ถึง 6 ksc (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 5 ksc

• ปูนสอที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา (MLC/FA-m)

ปูนสอ MLC มีคุณสมบัติทางแร่ธาตุหรือเคมีที่ประกอบไปด้วยแคลไซต์ (หรือแคลเซียมคาร์บอเนต) ร้อยละ 60 และควอตซ์ (หรือซิลิกอนไดออกไซด์) ร้อยละ 20 โดยมีเหล็กออกไซด์และเฟลด์สปาร์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย โดยที่ไม่มีไมกาหรือเศษหินปะปนอยู่ มีควอตซ์หรือเม็ดทรายรูปร่างตั้งแต่กึ่งเหลี่ยมไปถึงกลมขนาดตั้งแต่ 0.25 ถึง 2.5 มิลลิเมตรทำหน้าที่เป็นมวลรวมหลัก มีอัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ (หรือปูน) : ควอตซ์ (หรือทราย) 10:3 แต่หากนับแร่ธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบเป็นมวลรวมด้วย จะมีอัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ : มวลรวมทั้งหมดคือ 10:7 เนื้อปูนมีสีเทาอ่อนอมน้ำตาลถึงสีเทาอ่อน

ร้อยละของความเป็นรูพรุนของปูนสอ MLC คือ 15 ถ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ หรือประมาณร้อยละ 40 เมื่อใช้เครื่อง MIP ในการตรวจสอบ แต่เมื่อทดสอบโดยใช้วิธีแช่น้ำให้อิ่มตัวจะมีค่าความพรุนประมาณร้อยละ 19 โดยรูพรุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.007 ไมครอนถึง 0.334 มิลลิเมตร โดยการกระจายตัวของรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ที่ขนาด 25.2 ไมครอน สามารถดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 2.7 มิลลิเมตร/นาที และมีความสามารถในการดูดซึมน้ำจนอิ่มตัว (WAC) ที่ 12.06 ซึ่งก้อนปูนขนาด 2.5x2.5x2.5 เซนติเมตรสามารถอิ่มน้ำได้ภายในเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.5 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ลูกบาศก์เซนติเมตร และระเหยน้ำจนแห้งสนิทภายในเวลา 144 ชั่วโมง โดยมีอัตราการระเหยน้ำโดยเฉลี่ย 0.01 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร แต่ไม่ยอมให้ความชื้นที่อยู่ด้านในของปูนสอระบายออกสู่ภายนอก เพราะอัตราการยอมให้ความชื้นระเหยผ่านมีค่าใกล้เคียงกับ 0.000 กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ประมาณ 257 ksc (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

• ปูนฉาบที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา (MLC/FA-p)

ปูนฉาบสมัยใหม่ MLC มีคุณสมบัติทางแร่ธาตุหรือเคมีที่ประกอบไปด้วยแคลไซต์ (หรือแคลเซียมคาร์บอเนต) ร้อยละ 60 และควอตซ์ (หรือซิลิกอนไดออกไซด์) ร้อยละ 15 โดยมีเหล็กออกไซด์ เฟลด์สปาร์ และไมกาเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย แต่ไม่มีเศษหินปะปนอยู่เลย มีควอตซ์หรือเม็ดทรายรูปร่างกึ่งกลมและกลมขนาดตั้งแต่ 0.5 ถึง 5

มิลลิเมตรทำหน้าที่เป็นมวลรวมหลัก มีอัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ (หรือปูน) : ควอตซ์ (หรือทราย) 10:3 แต่หากนับแร่ธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบเป็นมวลรวมด้วย จะมีอัตราส่วนระหว่างแคลไซต์ : มวลรวมทั้งหมดคือ 10:7 เนื้อปูนมีสีน้ำตาลอ่อนมาก

ร้อยละของความเป็นรูพรุนของปูนฉาบ MLC คือ 15 ถ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ หรือประมาณร้อยละ 36 เมื่อใช้เครื่อง MIP ในการตรวจสอบ แต่เมื่อทดสอบโดยใช้วิธีแช่น้ำให้อิ่มจะมีค่าความพรุนประมาณร้อยละ 20 โดยรูพรุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.007 ไมครอนถึง 0.334 มิลลิเมตร โดยการกระจายตัวของรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ที่ขนาด 0.348 ไมครอน สามารถดูดซึมน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 2.7 มิลลิเมตร/นาที และมีความสามารถในการดูดซึมน้ำจนอิ่มตัว (WAC) ที่ 17.19 ซึ่งก้อนปูนขนาด 2.5x2.5x2.5 เซนติเมตรสามารถอิ่มน้ำได้ภายในเวลา 72 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 0.57 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และระเหยน้ำจนแห้งสนิทภายในเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีอัตราการระเหยน้ำโดยเฉลี่ย 0.02 มิลลิเมตร/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร และยอมให้ความชื้นที่อยู่ด้านในของปูนฉาบระบายออกสู่ภายนอกด้วยอัตราประมาณ 0.001 กรัม/ชั่วโมง/ตารางเซนติเมตร มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ประมาณ 43 ถึง 53 ksc (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 47 ksc

• การเปรียบเทียบคุณสมบัติของปูนสมัยใหม่กับปูนโบราณอยุธยา และความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการอนุรักษ์

ตารางที่ 7: การเปรียบเทียบคุณสมบัติของปูนโบราณอยุธยาและปูนสมัยใหม่

ชนิดปูน	องค์ประกอบแร่ธาตุ-เคมี										รูปร่างทราย						ลม			ร้อยละรูพรุน			ขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ (ไมครอน)	คาปิลลารี		การดูดซึมน้ำ		การระเหยน้ำ			
	แคลไซต์	ควอตซ์	สีมาไทต์	เฟลด์สปาร์	ไมกา	เซรามิก	ปูนทราย	ปูนมวลรวม	ขนาดทราย		เหลี่ยม	กึ่งเหลี่ยม	กึ่งกลม	กลม		เส้นใย	ขาว	น้ำตาลอ่อนมาก	เทาอ่อน	กล้องจุลทรรศน์	MIP	แช่น้ำอิ่มตัว		ความสูง (มม.)	อัตราคาปิลลารี (มล./นาที)	WAC	ระยะเวลาอิ่มน้ำ (ชม.)	อัตราดูดซึมน้ำ (มล./ชม./ตร.ซม.)	ระยะเวลาแห้ง (ชม.)	อัตราระเหยน้ำ (มล./ชม./ตร.ซม.)	อัตราความชื้นระเหยผ่าน (ก./ชม./ตร.ซม.)	ความสามารถรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
HAL-m	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1:0.1 ถึง 1:1.5	1:0.2 ถึง 1:2.3	0.25 - 5		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		2-35	26-54	22-40	0.05-33	4-13.5	1.8-4	9-29	24-168	0.17-1.25	48-168	0.02-0.03	0.001-0.002	3-79
HAL-p	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1:0.3 ถึง 1:1.8	1:0.7 ถึง 1:3	0.1-5		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		5-25	26-40	20-33	0.04-10.84	3.4-13.4	1-3	15-19	8-168	0.60-0.91	48-120	0.01-0.03	0.0005-0.002	17-77
NMLC	✓	✓	✓	✓			1:1.1	1:1.5	0.5-3.5		✓	✓	✓				✓			15	31.1	16.2	16.35	คาดว่า 30	4.6	13.7	48	0.67	48	0.02	0.003	7-10
NL	✓	✓	✓	✓			1:0.6	1:1	0.25-2		✓	✓	✓	✓			✓			5	30.6	12.7	0.35	คาดว่า18.1	3.8	12.5	48	0.55	24	0.01	0.001	4-6
MLC-m	✓	✓	✓	✓			1:0.3	1:0.7	0.25-2.5			✓	✓	✓					✓	15	39.8	18.9	25.2	14.1	2.7	12.1	48	0.5	144	0.01	0.0000	245-280
MLC-p	✓	✓	✓	✓	✓		1:0.3	1:0.7	0.5-5				✓	✓	✓			✓		15	35.79	19.92	0.348	11.5	1.6	17.2	48	0.57	48	0.02	0.001	43-52
หน้า																															80

หากแยกพิจารณาคุณสมบัติของปูนสมัยใหม่ทีละด้าน (ดูตารางที่ 7) พบว่าปูนสมัยใหม่ NMLC, NL, MLC-m และ MLC-p มีองค์ประกอบทางแร่ธาตุและเคมีหลักเหมือนกับปูนสอและปูนฉาบโบราณ แต่จะต่างกันที่องค์ประกอบรอง ซึ่งองค์ประกอบรองเหล่านี้ในปูนสอและปูนฉาบโบราณก็มีเพียงปริมาณเล็กน้อย ดังนั้นการที่ปูนสมัยใหม่ขาดองค์ประกอบเหล่านี้ไปก็อาจไม่กระทบภาพรวมในส่วนขององค์ประกอบทางแร่ธาตุและเคมีหรือส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติในด้านอื่นมากนัก องค์ประกอบหลักที่เป็นแคลไซต์และควอตซ์ (ซึ่งก็คือปูนขาวและทราย) ในปูนสมัยใหม่และปูนโบราณต่างก็ประกอบกันในอัตราส่วนที่หลากหลายมาก จนไม่สามารถสรุปเป็นค่าอัตราส่วนที่เหมือนหรือต่างกันได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าปูนสมัยใหม่ที่กรมศิลปากรหล่อขึ้นมาเพื่อทดสอบในครั้งนี้ มีขนาดของเม็ดทรายเล็กกว่าของปูนโบราณในภาพรวม ซึ่งเม็ดทรายในปูนโบราณมีรูปร่างที่คละกันมากกว่าปูนสมัยใหม่ส่วนใหญ่ (ยกเว้นของปูน NL) และมีการใส่เส้นใยหรือวัสดุอื่นๆ เช่น ผงอิฐ เศษอิฐหัก และก้อนปูนขาวขนาดเล็กในทั้งปูนสอและปูนฉาบ ในขณะที่ปูนสมัยใหม่จะมีเฉพาะปูนฉาบที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา ณ อุโบสถวัดแค (MLC-p) เท่านั้นที่มีการผสมเส้นใยลงไปในปูน แต่ไม่มีการผสมเส้นใยลงไปในปูนหล่อใหม่ตามสูตรของกรมศิลปากร (NMLC และ NL) และปูนสอที่ใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา (MLC-m) คุณสมบัติอีกประการที่ปูนหล่อใหม่ของกรมศิลปากรทั้ง 2 สูตรแตกต่างจากปูนโบราณอยุธยาคือสี กล่าวคือสีของปูนสมัยใหม่ 2 สูตรนี้มีความขาวถึงขาวมากกว่าปูนโบราณ ในขณะที่ปูน MLC-p มีสีที่ใกล้เคียงกับปูนโบราณ และปูน MLC-m มีสีเทาอ่อนซึ่งแตกต่างจากสีของปูนโบราณอย่างเห็นชัดเจน ซึ่งหากนำปูนสอที่กรมศิลปากรใช้ในการอนุรักษ์ที่ผ่านมาและปูนที่ใช้ในการอนุรักษ์ในปัจจุบันมาใช้ร่วมกับปูนโบราณ ก็อาจทำให้เกิดความไม่กลมกลืนกับสีของปูนโบราณได้

ในประเด็นเรื่องความเป็นรูพรุนและความสามารถในการดูดซึมน้ำ ปูนสมัยใหม่ทุกสูตรมีความพรุนน้อยกว่าปูนโบราณอยุธยาส่วนใหญ่ ซึ่งส่งผลให้ปูนสมัยใหม่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างน้อยกว่า และใช้เวลาในการอิ่มน้ำมากกว่าปูนโบราณบางส่วน และมีขนาดของรูพรุนส่วนใหญ่ที่ใหญ่กว่า โดยหลักการแล้วคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ปูนสมัยใหม่มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเพราะน้ำน้อยกว่าปูนโบราณ เพราะสามารถดูดซึมน้ำเข้าสู่เนื้อปูนได้น้อยกว่าและดูดน้ำเข้าไปได้ระยะทางที่สั้นกว่า (ความไกลของน้ำที่ถูกดูดเข้าไปในท่อของรูพรุนจะแปรผกผันกับขนาดของรูพรุน รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่าจะดูดน้ำเข้าไปในรูด้วยกระบวนการคาปิลลารีได้ไกลกว่า) เมื่อนำมาใช้ร่วมกันจะมีโอกาสที่ปูนโบราณจะเสื่อมสภาพมากขึ้น แต่ทั้งปูนสมัยใหม่และปูนโบราณใช้เวลาในการแห้งจนแห้งสนิทใกล้เคียงกัน ด้วยอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกัน

ปูนสมัยใหม่ NMLC, NL และ MLC-p มีคุณสมบัติในการยอมให้ความชื้นระเหยผ่าน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของปูนขาวโบราณโดยเฉพาะปูนฉาบ ที่ควรอนุญาตให้น้ำหรือความชื้นที่อาจมีอยู่ในผนังหรือกำแพงอิฐ (อาจจะมาจากน้ำใต้ดินที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ผนังหรือกำแพงด้วยกระบวนการคาปิลลารี) ระเหยผ่านออกสู่ภายนอกได้ เหมือนกับปูนโบราณของอยุธยา ในขณะที่ปูน MLC-m ซึ่งสันนิษฐานจากสีว่ามีส่วนผสมหรือเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่มีคุณสมบัติข้อนี้ กล่าวคือไม่ยอมให้ความชื้นระเหยผ่าน จึงไม่ควรนำมาใช้ในการอนุรักษ์หรือใช้ร่วมกับวัสดุในโบราณสถานทั้งในพระนครศรีอยุธยาและแหล่งโบราณสถานอื่นๆ เพราะเมื่ออิฐหรือปูนโบราณเปียกหรือมีความชื้นอยู่ แต่มีปูนผสมปูนซีเมนต์ซึ่งไม่ยอมให้ความชื้นระเหยผ่านได้มาสอหรือฉาบทับ ความชื้นที่อยู่ในอิฐหรือปูนโบราณที่สัมผัสกับปูนสอผสมปูนซีเมนต์เทานี้ จะไม่สามารถระเหยออกจากอิฐหรือปูนโบราณนั้นได้ และอาจทำให้อิฐหรือปูนโบราณนั้นชื้นอยู่ตลอดเวลา และเป็นสาเหตุที่ทำให้อิฐหรือปูนโบราณนั้นเสื่อมสภาพ

มากขึ้น ทั้งจากการเสื่อมสภาพเพราะน้ำหรือความชื้นที่ถูกขังอยู่ในเนื้อวัสดุเอง หรืออิฐและปูนนั้นจะกลายเป็นแหล่งน้ำให้กับจุลชีวะต่างๆ ใช้ในการเจริญเติบโต หรือน้ำที่ถูกขังนี้อาจหาทางระบายออกสู่ภายนอก โดยการเคลื่อนที่ไปสู่พื้นที่อื่นที่ยอมให้น้ำระเหยออกได้มากกว่า ซึ่งก็คือพื้นที่บริเวณอื่นที่มีปูนโบราณที่สอหรือฉาบอยู่นั่นเอง หรืออาจมาระเหยที่ผิวหน้าของอิฐโบราณที่ปูนสอหรือฉาบอาจหลุดร่อนหายไป ซึ่งอาจทำให้ปูนสอ ปูนฉาบ หรืออิฐโบราณในบริเวณที่น้ำมาระเหยออกนั้นเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้นได้ (Watsantachad, 2006-2007: 240-241)

ปูนสมัยใหม่ที่เป็นปูนหล่อใหม่ตามสูตรของกรมศิลปากรทั้งสองสูตร มีความสามารถในการรับแรงอัดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปูนโบราณอยุธยา และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของอิฐโบราณ ก็นับว่าเป็นความแข็งแรงที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการก่อหรือสออิฐโบราณในการบูรณะโบราณสถานได้ ทั้งนี้จากผลการทดสอบปูน NMLC และ NL ว่ามีความสามารถรับแรงอัดค่อนข้างต่ำนั้น อาจเป็นไปได้ว่าในขณะทดสอบก้อนปูนมีอายุเพียง 28 วัน กระบวนการคาร์บอเนชั่นของปูนหล่อใหม่นี้อาจยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่าความสามารถในการรับแรงอัดที่วัดได้นี้อาจไม่ใช่ค่าการต้านทานแรงอัดสูงสุดที่ปูนสอ NMLC และ NL จะรับได้ก็เป็นได้ ดังนั้นการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของปูนทั้ง 2 สูตรเมื่อเวลาผ่านไปนานกว่านี้ โดยเฉพาะปูน NMLC ซึ่งมีปูนซีเมนต์ขาวผสมอยู่ด้วย อาจเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษาต่อไปในอนาคต เพราะถ้าค่าความแข็งแรงสูงสุดนั้นสูงเกินกว่าค่าความแข็งแรงของปูนสอโบราณหรืออิฐโบราณ ปูนนี้ก็อาจไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ร่วมกับอิฐและปูนโบราณในการอนุรักษ์โบราณสถาน

ปูนสอที่กรมศิลปากรใช้ในอดีต (MLC/U-m) มีความสามารถในการรับแรงอัดมากกว่าปูนโบราณถึงประมาณ 9 เท่า และมากกว่าอิฐโบราณถึงเกือบ 3 เท่า ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งอันตรายอย่างยิ่งในการนำมาใช้ในอนุรักษ์โบราณสถานในอยุธยา เพราะเมื่อนำมาใช้ร่วมกับอิฐหรือปูนโบราณแล้วอาจทำให้อิฐและปูนโบราณร้าวหรือแตกหักได้ง่ายขึ้น (Watsantachad, 2006-2007: 240) ในขณะที่ปูนที่ใช้เป็นปูนฉาบในงานอนุรักษ์ที่ผ่านมามีความแข็งแรงใกล้เคียงกับปูนโบราณ และแข็งแรงน้อยกว่าอิฐโบราณ จึงนับว่าเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการฉาบกำแพงหรือผนังอิฐโบราณในการบูรณะโบราณสถาน

โดยสรุปแล้ว ปูนสมัยใหม่ที่กรมศิลปากรใช้ในการบูรณะโบราณสถานในปัจจุบันทั้งสองสูตร (NMLC และ NL) และปูนที่ใช้ฉาบในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา (MLC/U-p) โดยเฉพาะปูนขาวหมักผสมทราย (NL) ค่อนข้างจะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับปูนโบราณของอยุธยา และอาจนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานของอยุธยาได้ แต่ต้องมีการปรับปรุงส่วนผสม เช่น ปรับสี ปรับขนาดและรูปร่างของเม็ดทรายให้ใกล้เคียงกับของปูนโบราณ (ซึ่งอาจทำให้มีความพรุนที่มากขึ้นและมีขนาดของรูพรุนที่เล็กกว่าของปูนโบราณ) หรือเพิ่มส่วนผสมอื่นๆ เช่น เส้นใยหรือผงอิฐ เพื่อทำให้มีคุณสมบัติที่เข้ากันได้กับปูนและอิฐในโบราณสถานที่ต้องการอนุรักษ์ให้มากขึ้น รวมทั้งต้องมีการทดสอบความแข็งแรงของปูน NMLC และ NL เพิ่มเติม เมื่อกระบวนการคาร์บอเนชั่นเกิดขึ้นสมบูรณ์และปูนมีค่าความแข็งแรงสูงสุดแล้ว เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของวัสดุโบราณเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานอีกครั้ง ในขณะที่ปูนที่ใช้สอในการอนุรักษ์ที่ผ่านมา (MLC/U-m) ซึ่งสันนิษฐานว่ามีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ค่อนข้างมาก มีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งถ้านำมาใช้ร่วมกับวัสดุโบราณ อาจทำให้วัสดุโบราณเสื่อมสภาพในอัตราและปริมาณที่มากขึ้นได้

คำถามวิจัยหลัก: ***คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่จะนำมาใช้ในการบูรณะโบราณสถานในนครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา แหล่งมรดกโลก ให้เหมาะสมคืออะไร และสามารถกำหนดให้เป็นคุณสมบัติมาตรฐานของปูนสอและปูนฉาบที่จะนำมาใช้ในการบูรณะโบราณสถานของพระนครศรีอยุธยาได้หรือไม่***

จากหลักการอนุรักษ์สถาปัตยกรรมในระดับสากล ที่ระบุว่าควรอนุรักษ์วัสดุโบราณไว้ให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยจำกัดการใช้วัสดุใหม่หรือวัสดุทดแทนให้น้อยที่สุดหรือใช้เท่าที่จำเป็น และในกรณีที่จำเป็นต้องใช้วัสดุหรือวิธีการสมัยใหม่ในการอนุรักษ์ ก็ควรใช้วัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติที่กลมกลืนและเข้ากันได้กับวัสดุโบราณ (Venice Charter, 1964: Article 12, 15) ดังนั้นเราจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบโบราณของอยุธยา เพื่อใช้เป็นคุณสมบัติมาตรฐานหรือคุณสมบัติตั้งต้น เพื่อนำไปสู่การค้นหาวัสดุสมัยใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงและเข้ากันได้กับปูนสอและปูนฉาบโบราณ ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัติของปูนสมัยใหม่มาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบโบราณนั้น พบว่าปูนสมัยใหม่ที่กรมศิลปากรใช้ในงานอนุรักษ์อยู่ในปัจจุบัน มีคุณสมบัติส่วนใหญ่ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับคุณสมบัติของปูนโบราณอยุธยา (ตามที่ได้อภิปรายตอบคำถามวิจัยย่อยข้อที่ 2) แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานของอยุธยาทั้ง 3 ยุคสมัย (ยุคต้น ยุคกลาง และยุคปลาย) แสดงให้เห็นว่า ปูนสอและปูนฉาบที่ใช้มาตั้งแต่สมัยอยุธยาไม่มีสูตรหรือคุณสมบัติที่แน่นอนตายตัว หรือสามารถแบ่งแยกออกเป็นยุคได้ชัดเจนเหมือนลักษณะทางศิลปกรรมและสถาปัตยกรรม และโดยทั่วไป ปูนขาวสอหรือฉาบก็เป็นวัสดุที่มีความหลากหลายในตัวเอง (heterogeneous) **ดังนั้นจึงเป็นการยากและไม่สมควรที่จะกำหนดคุณสมบัติมาตรฐานของปูนสอและปูนฉาบที่จะนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานอย่างเหมาะสมขึ้นมา แล้วนำคุณสมบัติมาตรฐานนี้ไปใช้ในการพิจารณาเลือกปูนสอและปูนฉาบเพื่อใช้อนุรักษ์โบราณสถานในอยุธยาได้ทุกแหล่ง** แต่จะเป็นการสมควรตามหลักการอนุรักษ์มากกว่า ในการที่**ต้องศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบของโบราณสถานที่ต้องการอนุรักษ์ทีละแหล่ง ก่อนที่จะพิจารณาและกำหนดคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานในแต่ละแหล่งที่ศึกษามาแล้วนั้นต่อไป**

การที่ผลการศึกษาพบว่าทั้งปูนสอและปูนฉาบโบราณที่พบในโบราณสถานของอยุธยาที่เลือกมาศึกษาทำมาจากวัตถุดิบหลักสองชนิดคือปูนขาวและทราย แต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่หลากหลายและแตกต่างกันไปในแต่ละโบราณสถาน จึงนำไปสู่ข้อสรุปคุณสมบัติพื้นฐานของปูนสอและปูนฉาบที่เหมาะสมในการอนุรักษ์โบราณสถานอยุธยา คือ

1) ควรมีวัตถุดิบหลักที่ทำมาจากปูนขาวหรือแคลไซต์ และทรายที่มีการคัดขนาด รูปร่าง และสี รวมไปถึงมีการร่อนแยกขนาดทราย เพื่อให้ได้อัตราส่วนของทรายแต่ละขนาดที่จะนำมาผสมให้ใกล้เคียงกับทรายที่ผสมอยู่ในปูนโบราณ ณ โบราณสถานของอยุธยาที่กำลังจะอนุรักษ์แต่ละแหล่ง

2) ควรผสมปูนโดยมีอัตราส่วนของปูนต่อทรายที่ใกล้เคียงกับปูนโบราณที่ต้องการอนุรักษ์ อาจมีการเพิ่มเติมส่วนผสมอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของปูนให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานได้ เช่น เพิ่มเส้นใยเพื่อช่วยในการยึดเกาะตัวของปูน โดยเฉพาะในช่วงแรกของการก่อตัว เพิ่มผงอิฐเพื่อปรับสีของปูน และในขณะเดียวกันอาจทำหน้าที่เป็นวัสดุพอซโซลานเพื่อเพิ่มคุณสมบัติไฮดรอลิกให้ปูน เป็นต้น

3) ควรมีการทดสอบคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบใหม่ เพื่อให้มั่นใจว่าปูนสอและปูนฉาบใหม่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงหรือเข้ากันได้กับปูนสอ ปูนฉาบ และอิฐโบราณในโบราณสถานอยุธยาที่ต้องการจะอนุรักษ์ ก่อนนำปูนสอและปูนฉาบใหม่ไปใช้ร่วมกับวัสดุโบราณ ณ โบราณสถานนั้นๆ โดยที่คุณสมบัติที่ควรคำนึงถึง เช่น

• สี พื้นผิว และความแข็งควรใกล้เคียงกับปูนเดิม และควรมีกลมกลืนกับภาพรวมของโบราณสถานแต่ละแห่ง แต่อาจมีการทำพื้นผิวให้แตกต่างได้บ้างเมื่อสังเกตในระยะใกล้ เพื่อให้เป็นไปตามหลักการอนุรักษ์สากลที่แนะนำให้วัสดุใหม่ต้องประสานกลมกลืนกับภาพรวมทั้งหมดของโบราณสถาน แต่ในขณะเดียวกันต้องสามารถแยกแยะออกจากของเดิมได้ เพื่อไม่ทำให้เกิดการปลอมแปลงหลักฐานทางประวัติศาสตร์หรือศิลปกรรม (Venice Charter, 1964: Article 12)

• ควรมีความพรุนที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าปูนโบราณ ณ โบราณสถานแต่ละแห่ง เพื่อให้ปูนสอและปูนฉาบใหม่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงหรือมากกว่า โดยมีขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ที่ใกล้เคียงหรือเล็กกว่า เพื่อดูดน้ำด้วยกระบวนการคาปิลลารีให้ได้ใกล้เคียงหรือไกลกว่า เพื่อจะได้มีความเสี่ยงในการเสื่อมสภาพได้ง่ายกว่า และทำหน้าที่เป็นผู้พลีชีพ (sacrifier) ในการเสื่อมสภาพก่อนวัสดุโบราณที่อยู่ใกล้เคียง

• ควรมีความสามารถในการส่งผ่านความชื้น (ยอมให้ความชื้นระเหยผ่าน) ได้ใกล้เคียงหรือมากกว่าปูนสอหรือปูนฉาบเดิม โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องนำมาใช้ฉาบร่วมกับปูนฉาบโบราณหรือฉาบทับโครงสร้างอิฐเดิม เพื่อยอมให้น้ำหรือความชื้นสะสมที่อยู่ด้านในซึมออกมาหรือระเหยออกสู่ภายนอกได้ใกล้เคียงหรือมากกว่าวัสดุโบราณที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งปูนซีเมนต์มีคุณสมบัตินี้น้อยมาก และถ้านำมาใช้ฉาบบนผนังหรือโครงสร้างอิฐโบราณของอยุธยาซึ่งเป็นโครงสร้างแบบผนังรับน้ำหนักวางบนดิน (load-bearing wall) ที่น้ำหรือความชื้นจากใต้ดินอาจถูกดูดเข้ามาสะสมในโครงสร้างได้ตลอดเวลาด้วยกระบวนการคาปิลลารี เมื่อปูนซีเมนต์ไม่ยอมให้น้ำหรือความชื้นระเหยออกได้ จึงมีความเป็นไปได้อย่างมากที่ความชื้นจะหาทางระเหยออกในบริเวณอื่นที่ยอมให้ความชื้นระเหยออกได้มากกว่า เช่น บริเวณที่เป็นผนังอิฐเปลือย หรือบริเวณที่ยังมีปูนขาวฉาบโบราณหลงเหลืออยู่ และอาจทำให้อิฐหรือปูนฉาบโบราณในโบราณสถานของอยุธยาเสื่อมสภาพในอัตราและปริมาณที่มากกว่าเดิม

• เมื่อต้องนำมาใช้ทดแทนหรือร่วมกับอิฐหรือปูนโบราณในโบราณสถานแต่ละแห่ง ก็ควรมีความสามารถในการรับแรงอัดที่ใกล้เคียงหรือน้อยกว่าปูนหรืออิฐโบราณที่อยู่ใกล้เคียงนั้น เพราะเมื่อมีแรงมากระทำต่อโบราณสถาน ปูนสอและปูนฉาบที่นำมาใช้ในการอนุรักษ์ควรทำหน้าที่เป็นผู้พลีชีพที่แตกร้าวเสียหายก่อนวัสดุโบราณที่อยู่ใกล้เคียง เพื่อเป็นการช่วยอนุรักษ์อิฐและปูนโบราณที่ยังหลงเหลืออยู่บนโบราณสถานของอยุธยาให้คงอยู่ต่อไป

จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติพื้นฐานที่สรุปมาข้างต้นนี้ เป็นคุณสมบัติที่ค่อนข้างเป็นไปตามหลักการและแนวทางการอนุรักษ์วัสดุในโบราณสถานในระดับสากล ดังนั้นจึงอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของปูนที่เหมาะสมในการอนุรักษ์โบราณสถานอิฐในแหล่งโบราณสถานอื่นๆ ได้เช่นกัน เพราะ**หัวใจสำคัญในการที่จะได้ปูนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการอนุรักษ์โบราณสถานนั้น คือต้องศึกษาคุณสมบัติของอิฐและปูนในโบราณสถานที่ต้องการอนุรักษ์ก่อน แล้วจึงค้นหาปูนที่เข้ากันได้กับคุณสมบัตินั้นๆ ต่อไป**

นอกจากคุณสมบัติของปูนสอและปูนฉาบในโบราณสถานแต่ละแหล่งควรได้รับการศึกษาก่อนการพิจารณาหาปูนสอหรือปูนฉาบใหม่มาใช้ในการอนุรักษ์แล้ว หน้าที่และตำแหน่งของปูนสอและปูนฉาบบนโบราณสถาน สภาพแวดล้อม สภาพความเสียหาย และปัจจัยหรือสาเหตุที่ทำให้ปูนสอและปูนฉาบนั้นเสียหายหรือเสื่อมสภาพ เป็นสิ่งที่ต้องประเมินและศึกษาก่อนด้วย เพื่อที่จะนำข้อมูลส่วนนี้ไปประกอบการพิจารณาหาปูนสอ ปูนฉาบ และ/หรือวัสดุทดแทนที่นอกจากจะมีคุณสมบัติที่เข้ากันได้กับปูนสอและปูนฉาบโบราณแล้ว ยังต้องมีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่รักษา สร้างเสริม หรือทดแทนปูนสอหรือปูนฉาบโบราณตามแต่ลักษณะและความต้องการการอนุรักษ์ของปูนสอและปูนฉาบโบราณในแต่ละจุดและในแต่ละหน้าที่ด้วย เช่น ถ้าปูนสอหรือปูนฉาบสมัยใหม่ที่ต้องใช้งานใน

บริเวณที่อยู่ลึกเข้าไปในผนังหรือโครงสร้าง เช่น ปูนสำหรับเกราท์ (grout) ในรูเจาะเย็บ หรือในบริเวณที่มีความชื้นสูงจนกระบวนการคาร์บอเนชั่นของปูนขาวธรรมดาไม่สามารถเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นได้ช้ามาก การเพิ่มคุณสมบัติในการแข็งตัวได้ในน้ำหรือคุณสมบัติไฮดรอลิก (hydraulic) ให้กับปูนขาวสอหรือฉาบสมัยใหม่ โดยที่คุณสมบัติอื่นๆ ยังใกล้เคียงและเข้ากันได้กับวัสดุอื่นๆ ในโบราณสถาน อาจแก้ปัญหาการแข็งตัวช้าของปูนขาวหมักธรรมดา และช่วยทำให้การใช้ปูนขาวสมัยใหม่ในงานอนุรักษ์โบราณสถานเป็นไปได้อย่างสะดวกรวดเร็วและตอบสนองต่อการใช้งานมากขึ้นได้

บรรณานุกรม

- Ashurst, John. (1983). **Mortars, Plasters and Renders in Conservation**. Middlesex: ϵASA.
- ASTM C144-11. (2011). **Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.
- Bierbrier, Morris. (1982). **The Tomb-Builders of the Pharohs**. London: British Museum Pub.
- Boynton, Robert S. (1980). **Chemistry and Technology of Lime and Limestone**, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Chungsiriarak, Somchart. (2017). **Prawat Naewkid Tridsadee Lae Garn Patibat Nai Garn Anurak Boran Stan**. (In Thai) **[History, Concept, Theory and Practice of Ancient Monument Conservation]**. Bangkok: Silpakorn University.
- Ditsakun, Suphattharadit (M.C.). (1996). **Silpa Nai Prates Thai**. (In Thai) **[Art in Thailand]**. Bangkok: Thammasat Printing House.
- Dumrongrajanupab, Prince Tisavarakumarn. (1975). **Tamnan Phra Buddha Chedi**. (In Thai) [Buddhist Chedi Legend]. Bangkok: Guru Spha.
- ϵdwards, Andrew J. (2005). **Properties of Hydraulic and Nonhydraulic Limes for Use in Construction**. Doctor of Philosophy, Napier University.
- ϵN 197-1:2000. (2000). **Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements**. ϵuropean Standards, Pilsen, Czech Republic, www.en-standard.eu.
- FAD (Fine Art Department). (2012a). **Rai Garn Prakob Bab Krong Garn Fuenfoo Boran Stan Un Nerng Ma Jak Utokkapai Pee Por Sor 2554**. (In Thai) **[Specifications of the Rehabilitation of Ancient Monuments Suffered from the 2011 Great Flood Project]**. Fine Are Department, Thailand.
- FAD (Fine Art Department). (2012b). **Rai Garn Prakon Bab Ngarn Burana Boran Stan Wat Worachettharam, Tumbon Baan Pom, Amphoe Phra Nakorn Sri Ayutthaya, Chang wat Phra Nakorn Sri Ayutthaya**. (In Thai) **[Specifications of Conservation Work of Ancient Monuments at Worachettharam Temple]**. Fine Art Department, Thailand.

- FAD (Fine Art Department). (1990). **Pan Mae Bot Kronggran Anurak Lae Pattana Na korn Prawatsart Phra Nakorn Sri Ayutthaya**, (In Thai) **[Master Plan of Conservation and Development of Historic City of Ayutthaya Project]**, Bangkok: Samapan Garn Pim Co., Ltd.
- FAO-3 (Fine Art Office 3: Ayutthaya). (2007). **Rai Garn Prakob Bab Garn Som Burana Hor Rakhang, Chedi Rai, Kampheng Kaew, Peun Tang Dern Phai Nai Lae Rang Rabai Naam Wat Yai (Thep Nimitr) Tumbon Saam Thai, Amphoe Nakhon Luang, Changwad Phra Nakorn Sri Ayutthaya**. (In Thai) **[Restoration Specifications of the Bell Tower of Surrounding Chedis, Boundary Walls, Inner Pavements, and Gutters of Ayutthaya's Yai Temple]**. Fine Art Department, Thailand.
- Ghosh, A. (1989). **An Encyclopedia of Indian Archaeology, Volume 1 Subjects**. New Dlehi: Munshiram Manoharlal Publishes, Pvt, Ltd.
- Harris, Cyril M. (1983). **Illustrated Dictionary of Historic Architecture**. New York: Dover.
- Hartshorn, Heather. (2012). **Dolomitic Lime Mortars: Carbonation Complications and Susceptibility to Acidic Sulfates**. Master of Science in Historic Preservation, Columbia University.
- Henry, Alison and Steward, John. (Eds.). (2011). **English Heritage Practical Building Conservation: Mortars, Renders and Plasters. Surrey**, England: Ashgate Publishing Limited.
- Hewlett, Peter C. (2004). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4th ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- ICOMOS. (2014) **Report on the ICOMOS Advisory Mission to Historic City of Ayutthaya (C 576)** (28 April-2 May 2014). Retrieved February, 14, 2017, from https://whc.unesco.org/document/136457.
- Joyklad, Panuwat and Pimanmas, Amon. (n.d.). **Cement, Patigiriya Cement Lae Chanid Khong Cement**. (In Thai) **[Cement, Cement Chemical Reaction and Types of Cement]**. Retrieved September 1, 2018, from http://www.coe.or.th/coe-2/download/Articles/Amorn/Concrete/Chapter_1.pdf.
- Khemnak, Payao. (2017). **It Gao Lao Reung**. (In Thai) **[Stories from Ancient Bricks]. A Handout Distributed in the Pilot Workshop of Conservation Masons (Brick Monuments)** Cooperatively Organized by Fine Art Department and UNESCO Bangkok, August 7-12 and September 4-9, 2017 at Ayutthaya.

- Kirca, Ö. (2005). **Ancient Binding Materials, Mortars and Concrete Technology: History and Durability Aspects. Modena, Lourenço and Roca.** (Eds.) Structural Analysis of Historical Constructions. London: Taylor and Francis Group.
- Klemm, Werner and Siedel, Heiner. (2002). **Evaluation of the Origin of Sulphate Compounds in Building Stone by Sulphur Isotope** Ratio. Geological Society, Special Publications 205: 419-429.
- Leksukhum, Santi. (2007). **Silpa Ayutthaya Ngarn Chang Luang Haeng Phandin**. (In Thai) **[Ayutthaya Art, Royal Craft of Thailand]**. Bangkok: Meung Boran.
- Liversidge, Joan. (1983). **Wall Pantin and Stucco. A Handbook of Roman Art: Survey of the Visual Art of the Roman World**. Oxford: Phaidon.
- Mach, Robert C. and Speweik, John p. (1998). **Preservation Brief 2: Repointing Mortar Joints in Historic Masonry Buildings**. Retrieved March 28, 2018, from Technical Preservation Service, National Park Service, U.S. Department of Interior, https://www.nps.gov/tps/how-to-preserve/preservedocs/preservation-briefs/02 Preserve-Brief-MortarJoints. pdf.
- Matichon Online. (2017). **Bor Mak Poon Boran at Wat Tawed Ayutthaya**. (In Thai) **[Historic Lime Slaking Well at Wat Tawed Temple]**. Retrieved March 11, 2018, from https://www.matichon.co.th/education/news_515220.
- Meade, Richard Kidder. (1906). **Portland cement: its composition, raw materials, manufacture, testing and analysis**. Easton, PA: The Chemical Publishing Co.
- Moore, Dylan. (2017). **Cement Kilns: Clinker Thermochemistry**. Retrieved March 14, 2018, from https://www.cementkilns. co.uk/ckr_therm.html.
- Nim-ngarm, Pijit. (2007). **Garn Pun Poon Tum**. (In Thai) **[Pestled Stucco Molding]**. Bangkok: Fine Art Department.
- Pengtako, Prateep. (1994). **Wat Chai Wattanaram**. (In Thai) **[Chai Wattanaram Temple]**. Bangkok: Idea Square Part., Ltd.
- Peterson, Sten. (1981). **Lime Water Consolidation**. In The 3rd Symposium of Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings, November 6, 1981, Rome, Italy. Rome: ICCROM, 53-61.
- Pinyovanichaka, Visut. (1994). **Moradok Loke Ayutthaya: Mork Tee Yang Prah Mua**. (In Thai) **[Ayutthaya World Heritage: Blurred Fog]**. Siam Araya (In Thai) [Civilized Siam] 2, 13 (October): 38-41.

Prasartsert, Chomphoonuch. (1997) **Reung Khong Poon: Technic Garn Trium Poon Pun Bab Praphaenee Khong Phak Neur Lae Changwad Petchburi.** (In Thai) **[About Lime: Technics to Traditionally Prepare Stucco of the Northern Thailand and Petchburi Province].**" Meung Boran (Ancient Cities), 23, 4 (October-December 1997): 54-64.

- Prasomsri, Paitoon. (2001). **Wassadu Satra.** (In Thai) **[Materials Science].** Bangkok: Nana Sing Pim.
- Saisingha, Sakchai. (2015). **Stupas in Thailand: Concepts, Meanings, Stylistic Development, and Historical Analysis.** (In Thai) Final Research Report, Silpakorn University.
- SU (Silpakorn University), Department of History of Art. (2012). **Samud Parb Silpa Ayutthaya.** (In Thai) **[Photo Book of Ayutthaya Art].** Bangkok: Sakdisopa Publishing.
- TIS 202 Book 1-2548. (2005). **Mor Aor Gor 202 Lem 1: Bod Niyam Giaw Gub Poon Lime and Hin Poon.** (In Thai) **[Lime Book 1: Definition of Lime and Limestone].**" Retrieved March 12, 2018, from Thai Industrial Standard (TIS), Ministry of Industry, http://www.fio. co.th/p/tisi_fio/fulltext/TIS202_1-2548.pdf.
- Torney, Clare and Snow, Jessica. (2014). **Lime Mortars in Traditional Buildings: Short Guide 6.** Scotland: Historic Scotland.
- UNESCO. (n.d.). **Historic City of Ayutthaya.** Retrieved February 14, 2017, from https://whc.unesco.org/en/list/576.
- Poshyanandana, Vasu. (2009). **Rai Garn Prakob Bab Burana Hor Phra Tri Pidok Khana 5 Wat Thepthidaram Worawihara.** (In Thai) [Restoration Specifications of the Tripitaka Hall of Group 5, Thepthidaram Worawihara Temple]. Retrieved June 14, 2016, from http://vasuposh.blogspot.com/2009/08/blog-post_23.html.
- Venice Charter. (1964). **International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites.** Retrieved May 28, 2018 from ICOMOS, https://www.icomos.org/charters/venice_e.pdf.
- Watsantachad, Nuanlak. (2018). **Garn Todsob Buengton Peur Garn Anurak It Lae Poon Nai Boran Stan.** (In Thai) **[Basic Characterization Tests for Conserving Ancient Brick, Lime Mortar and Plaster].** Bangkok: Faculty of Architecture, Silpakorn University.

- Watsantachad, Nuanlak. (2006-2007). **Gluer Nai Gum Phaeng It.** (In Thai) **[Salts in Brick Walls]**. Najua 22 (2006-2007): 237-254.
- WHC (World Heritage Committee). (2015). **WHC-15/39.COM/7B**. Retrieved Febrauary 14, 2017, from https://whc.unesco.org/archive/2015/whc15-39com-7B-en.pdf.
- Wilkinson, Richard H. (2000). **The Complete Temples of Ancient Egypt**. London: Thames Hudson.

สัมภาษณ์

- Aranyanark, Jiraporn. (2016, August 5) Interview. Siam Research and Innovation Co.,Ltd., Kaeng Khoi, Saraburi.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณองค์การยูเนสโกและสำนักงานทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ ที่สนับสนุนเงินทุนในการวิจัย; กรมศิลปากร สำนักสถาปัตยกรรม สำนักศิลปากรที่ 3 และอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล วัสดุ และอำนวยความสะดวกในระหว่างการวิจัย; และบริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด ในเครือบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), กรมทรัพยากรธรณี, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุเคราะห์ เอื้อเฟื้อ หรือสนับสนุนสถานที่ เจ้าหน้าที่ และ/หรือเครื่องมือในการทดสอบ

ขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.สันติ เล็กสุขุม, ศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ชัย สายสิงห์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิบูลย์ จินาวัฒน์, อาจารย์จิราภรณ์ อรัณยะนาค, ผู้ช่วยศาสตราจาย์ ดร.ฉวีวรรณ ประจวบเหมาะ, ดร.ปริตตา เฉลิมเผ่า กออนันตกูล, คุณประทีบ เพ็งตะโก รองอธิบดีกรมศิลปากร (อดีตผู้อำนวยการสำนักศิลปากรที่ 3), ดร.วสุ โปษยะนันทน์, คุณมนัชญา วาจก์วิศุทธิ์, คุณอรรถสิทธิ์ อินต๊ะ, คุณทรงยศ วงศ์ประพฤติดี, เจ้าหน้าที่และช่างของสำนักศิลปากรที่ 3 และอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา, คุณมณฑิรา หรยางกูร อูนากูล, คุณมนทกานติ์ ส.กิตติไพศาลศิลป์, คุณโจ (Dr. Josephine D'Ilario), ดร.กุลชยา พฤทธิอานันต์, คุณลลิลทิพย์ บุญธรรมจินดา, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทรคุณ, คุณณัฐนันท์ วงศ์อนันต์, คุณปิยธิดา พิชชโยธิน และคุณนิพนธ์ กฤษณวิภาคพร ที่มีอุปการคุณ เป็นที่ปรึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ หรือกำลังใจมาตลอดการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณนักศึกษาในรายวิชาการอนุรักษ์วัสดุในโบราณสถาน หลักสูตรศิลปศาสตรมหาบัณฑิต (ประวัติศาสตร์สถาปัตยกรรม) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2558 และ 2559: พิเชฐ ธิถา, ยศพนธ์ เพ็ญธิยะ, ชิษณุพงศ์ รุจิโรจน์วรางกูร, มณฑลี ภู่กฤษณา และพัชรพงศ์ กุลกาญจนาชีวิน; และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องหรือมีส่วนร่วมที่อาจมิได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ได้ทุกท่าน ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี