[1,2,3,4,5,6,7,8,9] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
*Corresponding author; E-mail address: Sivanon_th@outlook.com

งานวิจัยเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ในการจัดทำข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติของวัดราชบพิธสถิตมหาสีมารามราชวรวิหาร การศึกษานี้ใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติแบบภาคพื้นดินเก็บข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของบริเวณวัด โดยนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและพัฒนาเป็นแบบจำลองกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติของวัดราชบพิธสถิตมหาสีมารามราชวรวิหาร ผ่านโปรแกรม Scene จากนั้นนำแบบจำลอง 3 มิติที่ได้มาดำเนินการประเมินขนาดของพระเจดีย์ พระอุโบสถ พระวิหาร และบริเวณโดยรอบภายในวัด ด้วยโปรแกรมเฉพาะทาง Autodesk Recap และ Autodesk Revit นอกจากนี้ยังทำการเก็บตัวอย่างวัสดุก่อจากโครงการบูรณะวัดราชบพิธครั้งใหญ่มาศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยการศึกษานี้จะนำเสนอสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุก่อที่สำคัญได้แก่ ความพรุน การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัด โดยข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติพร้อมทั้งข้อมูลด้านสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุก่อที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการติดตามสภาพโครงสร้างและประกอบการบำรุงรักษาในระยะยาวได้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ, เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์, วัดราชบพิธฯ, วัสดุก่อ, ฐานข้อมูลดิจิทัล

This research presents the application of the 3D Laser Scanning Technology for creating the 3D point cloud data of Wat Ratchabophit Sathitmahasimaram Ratchaworawihan. The terrestrial laser scanner is applied for three-dimensional data acquisition of the temple. The Scene software was applied to process the acquired data and developed the 3D point cloud model of Wat Ratchabophit. The current dimensions of the iconic Chedi, the ordination hall, the main assembly hall, and surrounding area inside the temple are carried out by using the particular software namely, Autodesk Recap and Autodesk Revit. The samples of masonry materials were collected from the major renovation project of Wat Ratchabophit for laboratory investigation. The main engineering properties of masonry materials including porosity, water absorption, density, and compressive strength are also presented. The 3D point cloud data and engineering properties data obtained in this study can be used for structural health monitoring and long-term maintenance.

Keywords: 3D Laser Scanner, 3D Point Cloud, Wat Ratchabophit, Masonry materials, Digital Database

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์มีบทบาทต่อการสำรวจและเก็บข้อมูลโบราณสถานเป็นอย่างมาก เพราะสามารถเก็บข้อมูลจำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว มีความละเอียดสูง สามารถเก็บข้อมูลได้โดยไม่ต้องมีการสัมผัส โดยนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์ และประเมินความเสียหายของโบราณสถานได้ การศึกษานี้จึงมีเป้าหมายที่จะแสดงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติกับโบราณสถานไทยในกลุ่มพระอารามหลวง โดยอาศัยวัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร ซึ่งเป็นโบราณสถานสำคัญในสมัยรัตนโกสินทร์เป็นกรณีศึกษา

วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม ราชวรวิหาร เป็นพระอารามหลวงชั้นเอกชนิดราชวรวิหาร [1] โปรดเกล้าให้สถาปนาขึ้นโดยพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว เมื่อปี พ.ศ.2412 โดยในปี พ.ศ. 2563 จัดเป็นปีศุภวาระสมโภช 150 ปีแห่งการสถาปนาวัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม ดังนั้นกรมศิลปากร ร่วมกับสำนักงานทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ จึงร่วมกันดำเนินโครงการบูรณปฏิสังขรณ์วัดราชบพิธฯ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 ซึ่งคณะผู้วิจัยได้มีโอกาสใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติเก็บข้อมูลตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นการบูรณะจนกระทั่งการบูรณะดำเนินการเสร็จสิ้นในต้นปี พ.ศ. 2563 ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จึงนับเป็นต้นแบบข้อมูลดิจิทัล 3 มิติสำหรับโบราณสถานประเภทพระอารามหลวงของไทย อันจะเป็นประโยชน์ในด้านการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้าง พร้อมทั้งเป็นฐานข้อมูลสำหรับการอนุรักษ์และการศึกษาในด้านต่าง ๆ ได้แก่ วิศวกรรม สถาปัตยกรรม โบราณคดี และศิลปกรรม เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นทางคณะผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ เข้ามาใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพปัจจุบันของวัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูล

อย่างต่อเนื่องในช่วงที่มีการปรับปรุงซ่อมแซมอาคารสำคัญต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์และประเมินสภาพของอาคารสำคัญต่าง ๆ อันได้แก่พระเจดีย์ พระอุโบสถ วิหาร รวมถึงอาคารต่าง ๆในเขตพุทธาวาส การวิเคราะห์และประเมินข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่ได้จากการสำรวจจะอาศัยโปรแกรมเฉพาะทางต่าง ๆ ได้แก่ Scene Autodesk Recap และ Autodesk Revit เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำการเก็บตัวอย่างวัสดุก่อจากโครงการบูรณะวัดราชบพิธฯ มาศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยบทความนี้จะนำเสนอตัวอย่างข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติพร้อมทั้งข้อมูลด้านสมบัติทางวิศวกรรมของเศษวัสดุก่อโบราณที่ได้จากการบูรณะ โดยข้อมูลและผลการศึกษาที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้ในการติดตามสภาพโครงสร้างและประกอบการอนุรักษ์วัดราชบพิธฯ ในระยะยาวได้ต่อไปในอนาคต

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ เป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเพื่อสร้างแบบจำลองที่มีความเสมือนจริง ทั้งในงานก่อสร้างหรือซ่อมบำรุง จึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการนำมาใช้กับโบราณสถาน เพราะเป็นวิธีการเก็บข้อมูลโดยไม่ต้องสัมผัสกับพื้นผิวที่ต้องการเก็บข้อมูล เป็นการลดความเสี่ยงอันเนื่องมาจากการเก็บข้อมูลโบราณสถานได้ อีกทั้งสามารถตรวจสอบข้อมูล และติดตามสภาพของโบราณสถานเพื่อประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากปัจจัยทั้งภายนอกและภายใน ได้แก่ สภาพแวดล้อม ภัยพิบัติ และความเสื่อมของวัสดุ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติมีประโยชน์ในการเก็บข้อมูลมากกว่าวิธีอื่นดังเช่น González, J.A. และคณะ [2] ได้เสนอข้อมูลการสแกนวัตถุด้วยเลเซอร์แบบภาคพื้นดินโดยใช้ตรวจหาความเสียหายสำหรับโบราณสถาน โดยเลือกโบราณสถานของซานโตโดมิงโกซึ่งก่อสร้างเมื่อปีค.ศ. 1282 เป็นกรณีศึกษา ได้แสดงถึงตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการบูรณะ คือค่าการสะท้อนกลับของคลื่นจากกล้องสแกนวัตถุ 3 มิติ ที่กระทบกับหินแกรนิต ที่ต่างกันเนื่องจากความชื้น เพราะความชื้นเป็นปัจจัยส่งผลให้เกิดความเสียหายได้ อีกทั้งยังมีบทความที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถและประสิทธิภาพของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติในการเก็บข้อมูลโบราณสถาน Pritchard, D.และคณะ [3] , Noor, N.M. และคณะ [4] ได้จัดทำโครงการเก็บข้อมูลลักษณะเดียวกันโดยกล้องประเภท TLS ในโบราณสถานที่มีรายละเอียดต่าง ๆ ทั้งทางสถาปัตยกรรมและส่วนประกอบของโครงสร้างที่ซับซ้อน แสดงให้เห็นว่ากล้องประเภท TLS มีความสามารถในการเก็บข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่ครอบคลุมทั้งภายในและภายนอกอาคารต่อจำนวนจุดตั้งกล้องที่ไม่มากนัก แต่มีประสิทธิภาพในการเก็บข้อมูลโบราณสถานขนาดใหญ่และซับซ้อน แม้เก็บข้อมูลที่ระดับสูงของอาคาร หรือมีจำนวนผู้คนมากในขณะเก็บข้อมูล แต่ก็สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องสัมผัสกับโบราณสถานอีกด้วย หรือแม้กระทั่งในที่มืด Yumin, L. และคณะ [5] เสนอการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีการสแกน 3 มิติ เพื่อการอนุรักษ์งานแกะสลักในถ้ำประเทศจีน แม้สภาพภายในถ้ำจะมีแสงสว่างไม่เพียงพอแต่ก็สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างแม่นยำและไม่ต้องสัมผัสกับรูปสลัก เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิตินั้นสามารถเก็บข้อมูลได้อย่างรวดเร็วมากกว่าการเก็บข้อมูลด้วยวิธีเก็บข้อมูลแบบธรรมดา Guo, J. และคณะ [6] ได้ทำการวิเคราะห์เวลาในการประเมินโครงสร้างโดยวิธีทาง TLS ได้ผลว่าการเก็บข้อมูลโดย TLS สามารถเก็บข้อมูลได้เร็วกว่าวิธีเดิมถึง 2 เท่า

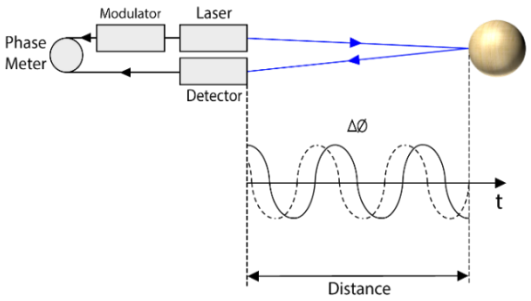
สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติกับโบราณสถานของไทยนั้น คณะผู้วิจัยจะอาศัยหลักการที่คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการไว้ผ่านกรณีศึกษาโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาดังรายงานของ สุทัศน์และคณะ [7] เป็นต้นแบบ โดยการศึกษาของ กันตภณและคณะ [8] ได้สรุปหลักการของเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ประเภทความต่างของเฟสคลื่น (phase shift) และการประมวลผลข้อมูลไว้ได้นี้

2.1 เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ คือ เทคโนโลยีการใช้ลำแสงเลเซอร์มาใช้ในการวัดระยะทางในทุกทิศทางจากจุดตั้งกล้องถึงตำแหน่งของวัตถุ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวถูกใช้ในการ เก็บรายละเอียด รูปทรง รูปร่าง ขนาด พิกัดตำแหน่ง (x,y,z) ของวัตถุต่าง ๆ อย่างอัตโนมัติ [9] โดยผลที่ได้จะถูกนำไปสร้างแบบจำลอง 3 มิติต่อไป

2.2 หลักการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์โดยความต่างของเฟสคลื่น (Phase Shift)

การเก็บข้อมูลโดยอาศัยหลักการความต่างเฟสคลื่นใช้การเปรียบเทียบกันระหว่างเฟสคลื่นที่ใช้ปล่อยออกไปอย่างต่อเนื่องเข้ากระทบวัตถุเปรียบเทียบกับเฟสคลื่นที่ได้จากการสะท้อนวัตถุกลับมา โดยการเปรียบเทียบดังกล่าวจะทำให้คำนวณระยะของวัตถุได้จากความต่างเฟสของคลื่นแสงที่ถูกส่งออกจากแหล่งกำเนิดกับคลื่นแสงที่สะท้อนกลับมายังตัวรับหลังจากสะท้อนพื้นผิววัตถุโดยการเก็บข้อมูลด้วยวิธีดังกล่าวจะใช้คลื่นเลเซอร์ที่มีความถี่สูงซึ่งจะสามารถทำให้ได้ผลที่แม่นยำแต่มีระยะทำการในการเก็บข้อมูลที่ไม่ไกลมากนัก [10]



ภาพจำลองการทำงานระบบความต่างเฟส

2.3 การประมวลผลข้อมูล

ข้อมูลที่เก็บได้จากแต่ละจุดตั้งกล้องจะมีการพิกัดอ้างอิงเทียบกับตำแหน่งจุดตั้งกล้อง ด้วยเหตุนี้เองข้อมูลที่ได้จากแต่ละจุดตั้งกล้องจะแยกกันอยู่ในแต่ละตำแหน่งของจุดตั้งกล้อง ดังนั้นจึงต้องทำการรวมผลแต่ละชุด

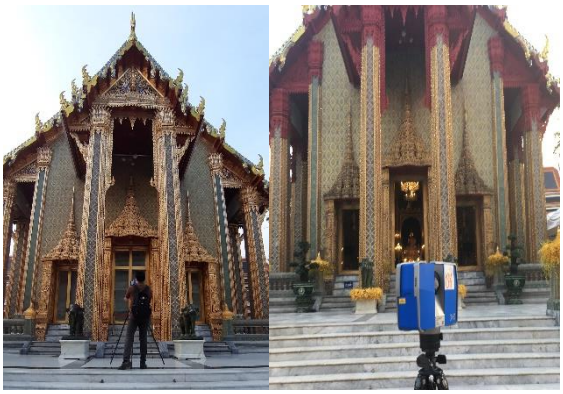
ข้อมูลเข้าด้วยกันให้อยู่ในพิกัดที่สัมพันธ์กัน โดยในงานวิจัยนี้ประมวลผลด้วยโปรแกรม SCENE ผ่านกระบวนการเชื่อมต่อภาพ (Registration)

การเชื่อมภาพด้วยการประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด (Image Based Registration) การศึกษานี้อาศัยการเชื่อมต่อภาพและข้อมูลด้วยวิธีการประมวลผลการซ้อนทับกันของข้อมูลกลุ่มจุด ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อข้อมูลโดยอาศัยหลักการประมวลการซ้อนทับกันของภาพผ่านโปรแกรมเฉพาะทาง ซึ่งโปรแกรมจะทำการประมวลผลการซ้อนทับจากภาพ และข้อมูลกลุ่มจุด (Point Cloud Data) จากนั้นจะเชื่อมต่อข้อมูลกลุ่มจุดที่มีองค์ประกอบซ้อนทับกันเข้าด้วยกัน จนสามารถผสานข้อมูลทั้งหมดเข้าเป็นข้อมูลชุดเดียวกันได้ ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ช่วยเหลือในการลงเก็บข้อมูลภาคสนาม เช่นเป้าอ้างอิง ทำให้ข้อมูล 3 มิติและภาพ 3 มิติที่ได้หลังจากเชื่อมต่อข้อมูลสวยงามเหมือนสถานที่จริงโดยไม่มีการบดบังด้วยเป้าอ้างอิง

การศึกษานี้มุ่งเน้นการสร้างฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้ประกอบการบูรณะปรับปรุงโบราณสถานรวมถึงเป็นข้อมูลสำหรับการประเมินและติดตามสภาพโบราณสถานในอนาคต โดยเน้นการรวบรวมข้อมูลสภาพปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ และการรวบรวมสมบัติของวัสดุก่อที่ได้จากการบูรณะ อันจะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการอนุรักษ์วัดราชบพิธฯ อย่างถูกต้องต่อไปในอนาคต โดยขั้นตอนการดำเนินงานสรุปได้ดังต่อไปนี้ 1.การลงพื้นที่เก็บข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ 2.การประมวลผลข้อมูลการสแกน 3 มิติ 3.สมบัติของวัสดุก่อ

3.1 การลงพื้นที่เก็บข้อมูลสแกนวัตถุ 3 มิติ

ในการลงพื้นที่เก็บข้อมูลได้เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ.2561 จนถึง พ.ศ.2563 เพื่อติดตามเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ปีเริ่มต้นถึงปีที่สิ้นสุดการบูรณะโดยใช้กล้อง FARO 330X ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คือ resolution 1/5 quality 4x ซึ่งมีรายละเอียดตามคู่มือของอุปกรณ์ [11]



การเก็บข้อมูลภาคสนามโดยกล้อง FARO 330X

โดยการเก็บข้อมูลจำเป็นจะต้องเลือกจุดตั้งกล้องที่ไม่ห่างกันมาก แต่ละจุดตั้งกล้องควรคำนึงว่า ณ จุดนั้นมีการเก็บข้อมูลบางส่วนในบริเวณเดียวกันกับจุดตั้งกล้องอื่น ให้ข้อมูลจุดตั้งกล้องนั้นซ้อนทับกับข้อมูลของจุดตั้งกล้องอื่นๆ เพื่อความสะดวกต่อการเชื่อมภาพด้วยการประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด (Image Based Registration)

หลังจากเก็บข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติเป็นที่เรียบร้อยแล้วจำเป็นจะต้องประมวลผลข้อมูลนั้นผ่านโปรแกรม SCENE เพื่อเป็นการเชื่อมต่อข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่เก็บรวบรวมมาให้เป็นข้อมูลกลุ่มจุดชุดเดียวกัน โดยใช้วิธีการเชื่อมภาพด้วยการประมวลผลข้อมูลกลุ่มจุด ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงผังภาพรวมของการเชื่อมต่อภาพที่ตำแหน่งจุดตั้งกล้องต่าง ๆ ในบริเวณเขตพุทธาวาส จากนั้นจะนำออกข้อมูลจากโปรแกรม SCENE เพื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดมิติด้วยโปรแกรม Autodesk Recap และ Autodesk Revit



ผังภาพรวมของข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติในเขตพุทธาวาส

3.2 การรวบรวมข้อมูลวัสดุก่อโบราณ

การศึกษานี้ได้ตัวอย่างเศษวัสดุโบราณการบูรณะวัดราชบพิธฯ ด้วยความที่จำนวนเศษวัสดุโบราณมีจำนวนจำกัด การศึกษานี้จึงเน้นไปที่สมบัติทางกายภาพของวัสดุ ได้แก่ ความพรุน การดูดซึมน้ำ การระเหยน้ำ ความหนาแน่น และค่ากำลังรับแรงอัด โดยอิงวิธีการทดสอบจาก Laboratory Manual for Architectural Conservators [12-13] และ Annual Book of ASTM Standards [14]

จากข้อมูลที่ได้ดำเนินการรวบรวมและประมวลผลตามแนวทางที่กล่าวแล้วข้างต้นสามารถสรุปผลการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1.ผลการประเมินสภาพปัจจุบันของวัดราชบพิธฯ โดยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ 2.ข้อมูลสมบัติของวัสดุก่อโบราณที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 การประเมินสภาพปัจจุบันของวัดราชบพิธฯ โดยเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ

จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลทั้งภายในและบริเวณโดยรอบวัดราชบพิธฯ ได้แก่ พื้นที่ในเขตสุสานหลวง และเขตพุทธาวาส รวมทั้งอาคารภายในเขตพุทธาวาส ได้แก่ พระเจดีย์ พระอุโบสถ พระวิหาร พระวิหารทิศตะวันออก

และทิศตะวันตก ศาลาราย หลังประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม SCENE ได้ตัวอย่างข้อมูลดังรูป 4 และ 5



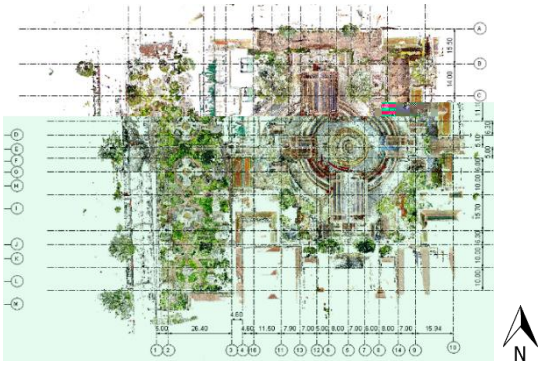
ชุดข้อมูลการสแกน 3 มิติ วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม



ชุดข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติวัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม
มุมมองด้านบน

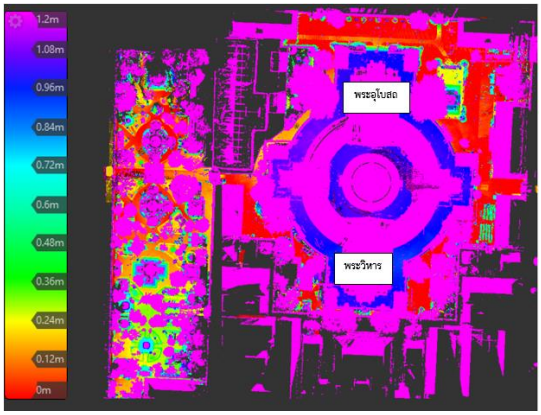
4.1.1 ประยุกต์ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ ในการสร้างผังบริเวณ และผังระดับ

เมื่อทำการประมวลข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติเรียบร้อยแล้ว จะนำข้อมูลที่ได้มาประยุกต์เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล และสร้างเป็นฐานข้อมูลดิจิทัล จากโปรแกรม SCENE สามารถส่งออกข้อมูลเพื่อมาวิเคราะห์ต่อในโปรแกรม Autodesk Revit โดยสามารถสร้างผังบริเวณ และสร้าง grid line ในแกนตั้งและแกนนอนเพื่อง่ายต่อการอ้างอิงดังแสดงในรูป 6



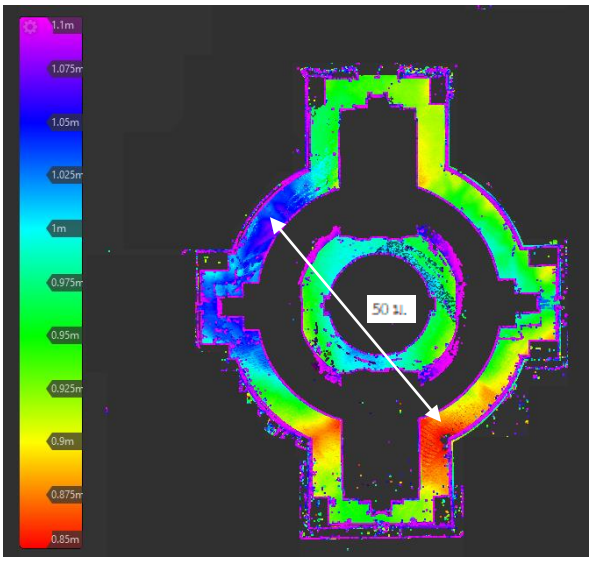
ผังบริเวณวัดราชบพิธสถิตมหาสีมารามจากข้อมูลกลุ่มผนวกกับ Grid line
มุมมองด้านบน

จากนั้นนำข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ เข้าสู่โปรแกรม Autodesk Recap เพื่อจัดทำผังงานระดับโดยตัวอย่างในรูปที่ 7 นี้จะกำหนดจุดอ้างอิง +0.00 เมตร ณ ตำแหน่งกึ่งกลางถนนอัษฎางค์ ทางเข้าสุสานหลวง



ผังค่าระดับพื้น วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่าระดับของพื้นจะอยู่ในช่วง +0.00 ถึง +1.20 เมตร จุดที่มีระดับต่ำจะถูกแสดงออกมาด้วยสีแดงดังเช่นในบริเวณด้านขวาของพระอุโบสถ จากข้อมูลสีระดับที่ได้มาทำให้สังเกตเห็นถึง บริเวณที่มีการทรุดตัวของฐานไพที เพื่อความละเอียดขึ้นของระดับจึงได้เลือกในเฉพาะส่วนของฐานไพทีมาวิเคราะห์ระดับดังรูปที่ 8

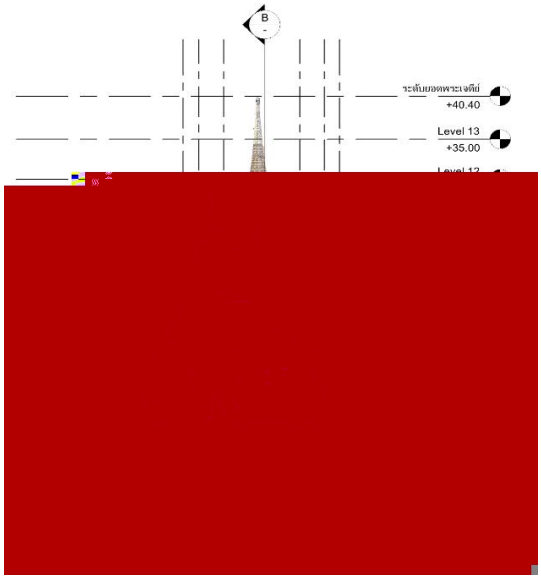


ผังค่าระดับพื้นบนฐานไพที

ค่าระดับพื้นอยู่ในช่วง +0.85 ถึง +1.10 เมตร โดยจะมีจุดต่ำสุดอยู่บริเวณขวาล่างของฐานไพทีหรือทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ และมีจุดที่สูงที่สุดอยู่ทางซ้าย หรือทางทิศตะวันออก ความต่างระดับประมาณ 0.25 เมตร ระยะความลาดจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดประมาณ 50 เมตร คิดเป็นอัตราความลาดชันประมาณ 1 : 200 ข้อมูลนี้จะสามารถนำมาใช้ประกอบการประเมินและติดตามสภาพ การทรุดเอียงของฐานไพทีได้ต่อไปในอนาคต

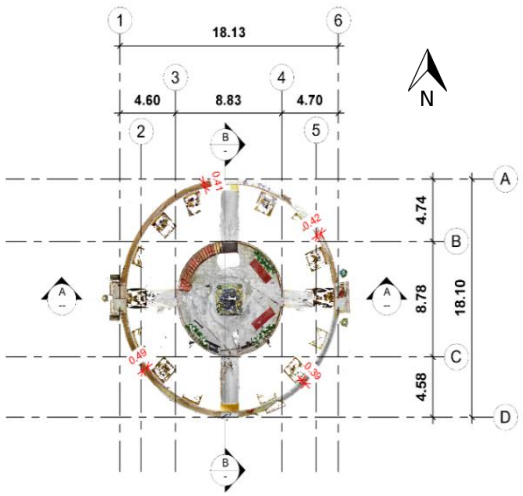
4.1.2 วิเคราะห์ขนาดมิติของข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ

จากข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ ผู้จัดทำได้เลือกพระเจดีย์มาเป็นตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดมิติเพราะเป็นอาคารโบราณที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของวัดราชบพิธฯ และมีองค์ประกอบเหมาะสำหรับเป็นตัวอย่างการวิเคราะห์ขนาดมิติ โดยการศึกษานี้ทำการประเมินขนาดฐานพระเจดีย์ รวมถึงองศาการเยื้องศูนย์ที่ระดับความสูงต่าง ๆ เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการประเมินและติดตามสภาพ โดยทำรูปด้านและประเมินค่าระดับความสูงของพระเจดีย์ในชั้นต่าง ๆ ดังรูปที่ 9 จะพบว่าพื้นระเบียงอยู่สูงจากฐาน 7.90 เมตร และพระเจดีย์มียอดสูงจากฐาน 40.40 เมตร



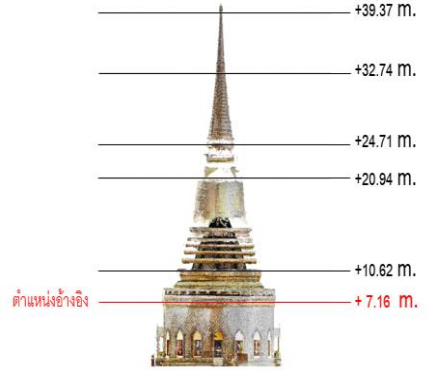
พระเจดีย์มุมมองด้านทิศเหนือ

และ จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานพระเจดีย์ มีขนาด เฉลี่ย 18.115 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นพระเจดีย์ภายในมีขนาดเฉลี่ย 8.81 เมตร



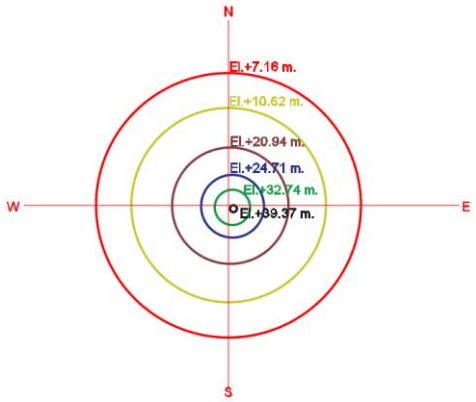
รูปตัดระดับฐานพระเจดีย์ ตำแหน่ง +0.00 ม.

เพื่อที่จะหาระยะ และ องศาการเยื้องศูนย์ในแต่ละระดับความสูง จึงได้แบ่งชั้นระดับความสูงไว้ดังรูปที่ 11



ระดับความสูงต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณาการเยื้องศูนย์ของพระเจดีย์

เมื่อพิจารณาในแต่ละระดับชั้นโดยใช้มุมมองด้านบนและกำหนดจุดศูนย์กลางการเยื้องศูนย์ที่ศูนย์กลางพระเจดีย์ที่ระดับ +7.16 ได้ดังรูปที่ 12



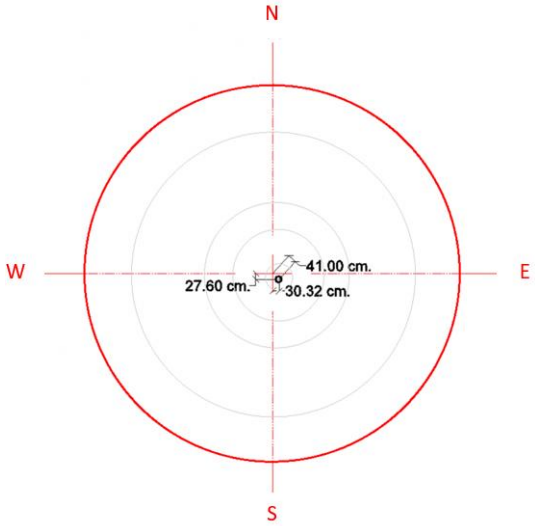
ระดับความสูงต่าง ๆ ที่พิจารณาการเยื้องศูนย์ของพระเจดีย์

ได้ข้อมูลการเยื้องศูนย์จากดังตารางที่ 1

1 ค่าการเยื้องศูนย์ที่ระดับความสูงต่าง ๆ

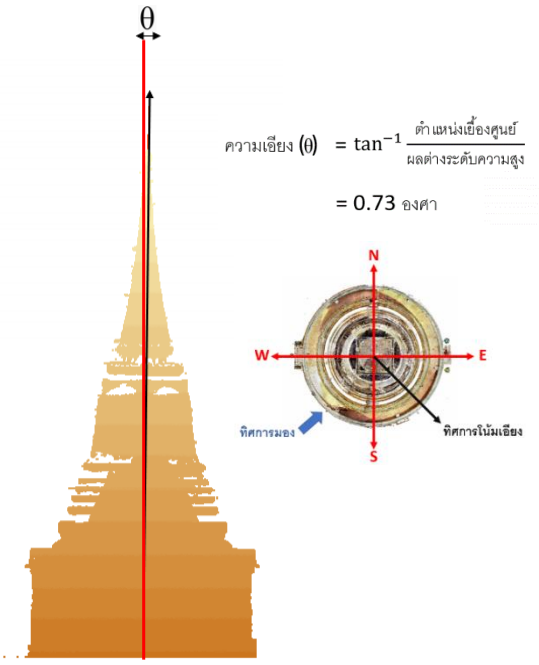
ระดับความสูง (ม.)				
	ทิศใต้ (ซม.)	ทิศตะวันออก (ซม.)	ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (ซม.)	องศา
7.16	จุดศูนย์กลางแกนอ้างอิง			
10.62	5.03	3.22	5.97	0.99
20.94	8.17	19.11	20.78	0.86
24.71	8.33	26.9	28.16	0.92
32.74	18.10	29.96	35.00	0.78
39.37	27.60	30.32	41.00	0.73

พิจารณาที่ตำแหน่งความสูงระดับ +39.37 เมตร มีระยะเยื้องศูนย์จากศูนย์กลางไปทางทิศใต้ 27.60 ซม. ทางทิศตะวันออก 30.32 ซม. หรือเยื้องไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ 41.00 ซม. ดังรูปที่ 13



ตำแหน่งเยื้องศูนย์ ณ จุดยอดพระเจดีย์ ระดับ +39.37 เมตร

และมีองศาความเอียงที่ระดับ +39.37 เมตร โน้มเอียงไป 0.73 องศา ในทิศตะวันออกเฉียงใต้ ดังรูปที่ 14



ขนาดมุมเอียงพระเจดีย์ระดับ +39.37 เมตร มุมมองทิศตะวันออกเฉียงใต้

การวิเคราะห์มิติขององค์พระเจดีย์ มีความสูงจากระดับพื้น 40.40 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางทิศตะวันออก-ตะวันตก 18.13 เมตร ทิศเหนือ-ใต้ 18.10 เมตร ที่จุดยอดหรือความสูงระดับ +39.37 เมตร มีตำแหน่งการเอียงเยื้องศูนย์จากตำแหน่งอ้างอิงที่ระดับ +7.16 เมตร เยื้องไปทางทิศใต้ 27.60 ซม. ทิศตะวันออก 30.32 ซม. โดยรวมแล้วเยื้องไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ 41.00 ซม. เทียบเป็น 0.73 องศา ซึ่งสอดคล้องกับการทรุดเอียงของฐานไพที

4.2 สมบัติวัสดุก่อ

หัวข้อนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ 1.การหาสมบัติของวัสดุก่อ 2.สมบัติของวัสดุก่อที่ได้จากห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบหาสมบัติของวัสดุก่อโบราณ ได้แก่ ความพรุน การดูดซึมน้ำ การระเหย ความหนาแน่น และค่ากำลังรับแรงอัด เนื่องจากตัวอย่างวัสดุโบราณมีจำนวนจำกัดและมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดจึงจำเป็นต้องนำตัวอย่างมาปรับแต่งให้เป็นลูกบาศก์ขนาด 4x4x4 ซม.[3]

4.2.1 การหาสมบัติของวัสดุก่อ

ตัวอย่างที่นำมาทดสอบ คืออิฐโบราณ โดยนำอิฐมาตัดแบ่งให้มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 4x4x4 ซม.[3] เพื่อเป็นการง่ายต่อการทดสอบ มีวิธีหาสมบัติของวัสดุก่อโดยมาตรฐานดังนี้ การดูดซึมน้ำ ความพรุนใช้มาตรฐานA Laboratory Manual for Architectural Conservators [12-13] และการระเหยน้ำใช้มาตรฐาน ASTM E96/E96M–16 [14]

การดูดซึมน้ำ (Absorption by total immersion) [12] ทดสอบได้โดยนำตัวอย่างลักษณะลูกบาศก์อบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักแห้ง (M_0) จากนั้นนำตัวอย่างแช่ในน้ำที่มีระดับน้ำเหนือตัวอย่างประมาณ 1 ซม. ทำการเก็บค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยเริ่มตั้งแต่ นาทีที่ 5 จนถึง 96 ชั่วโมง แล้วคำนวณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละความเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นตามเวลาต่าง ๆ ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำ (WA) สามารถหาได้ดังสมการ (1)

$$WA = \frac{M_n - M_0}{M_0} \; x \; 100 \qquad (1)$$

โดย WA คือ ความสามารถในการดูดซึมน้ำ, M_n คือน้ำหนัก ณ เวลา n ของตัวอย่างแช่น้ำ (กรัม), M_0 คือน้ำหนักแห้ง (กรัม)

ความพรุน (Porosity in solids) [13] เป็นการทดสอบทางอ้อมจากการทดสอบการดูดซึมน้ำเพื่อหาความพรุนของตัวอย่าง นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง คำนวณหาร้อยละของปริมาตรน้ำที่อยู่ภายในรูพรุนเทียบกับปริมาตรของตัวอย่างจากการแทนที่ด้วยน้ำ ดังสมการ (2)

$$Porosity = [\frac{V_p}{V_a}] \; x \; 100 \qquad (2)$$

โดย $Porosity$ คือร้อยละความพรุน, V_p คือปริมาตรของรูพรุน (ซม.^{3}), V_a คือปริมาตรแทนที่ด้วยน้ำ (ซม.^{3})

การระเหยน้ำ (Water vapor transmission) [14] ตัดตัวอย่างให้มีความหนา 1 ซม. จากนั้นนำตัวอย่างอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24

ชั่วโมง แล้วเชื่อมซีลิโคนรอบตัวอย่างปิดบนภาชนะบรรจุน้ำสะอาด เพื่อวัดปริมาณน้ำที่ระเหยออกผ่านหน้าตัดของตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 23°C ความชื้นอากาศร้อยละ 50 เป็นเวลา 14 วัน แล้วจึงคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากการระเหยน้ำผ่านหน้าตัดของตัวอย่าง

4.2.2 สมบัติของวัสดุก่อที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

การดูดซึมน้ำ (Absorption by total immersion) ทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐานโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังแช่น้ำเป็นเวลา 96 ชั่วโมงได้ค่าดังตารางที่ 2

2 ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของตัวอย่างวัสดุก่อ

การดูดซึมน้ำ				
ตัวอย่าง		B		
ลำดับที่		1	2	3
น้ำหนักแห้ง		96.92	118.17	98
96 ชั่วโมง	น้ำหนัก$_{96}$	116.43	141.99	117.22
ความสามารถดูดซึมน้ำ		20.13	20.16	19.61
เฉลี่ย		%	19.97	

จากตารางเห็นได้ว่า เมื่อแช่ตัวอย่างที่ 96 ชั่วโมง ทำให้ตัวอย่างมีน้ำหนักมากขึ้นประมาณ 20 กรัม โดยคิดเป็นร้อยละความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ประมาณ 19.97

ค่าความพรุน หาได้จากเทียบปริมาตร โดยสมการที่ (2) ได้ค่าตามตารางที่ 3

3 ค่าความพรุนของตัวอย่างวัสดุก่อ

ความพรุน				
ตัวอย่าง		B		
ลำดับที่		1	2	3
ปริมาตรรูพรุน		19.51	23.82	19.22
ปริมาตรแทนที่น้ำ		60	75	60
ความพรุน	%	32.52	31.76	32.03
	เฉลี่ย	32.10		

จากตารางเห็นได้ว่า ตัวอย่างทั้งสาม มีค่าความพรุนที่ใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 32.10 หรือมีความพรุนประมาณหนึ่งในสามของปริมาตรทั้งหมด

การระเหยน้ำทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่มีพื้นที่หน้าตัด 0.001580 ตร.ม. หนา 1 ซม. ชั่งน้ำหนักน้ำต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบหาอัตราการระเหยน้ำมีอัตราการระเหยน้ำเฉลี่ยที่ 0.0194 กรัม/ชั่วโมง ดังนั้นค่าการระเหยน้ำผ่านหน้าตัดของตัวอย่างเท่ากับ 12.29 กรัม/ชั่วโมง/ตร.ม.

ความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างวัสดุก่อ เมื่อนำตัวอย่างไปทดสอบจากการทดสอบหาค่าความแน่นโดยการชั่งน้ำหนักและหาปริมาตรของตัวอย่างโดยใช้หลักการแทนที่ของตัวอย่างในทรายละเอียดโดยใช้หลักการแทนที่ของตัวอย่างในทรายละเอียดแบบปล่อยตกโดยธรรมชาติ พบว่าค่าความหนาแน่น ความหนาแน่นของตัวอย่างเศษอิฐโบราณวัดราชบพิธฯ มีค่าเท่ากับ 1396 กก./ม.^{3} และค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐตัวอย่างใช้วิธีการกดด้วยเครื่อง Unconfined Compression Test ต่อกับ load cell ขนาด 38000 นิวตัน เนื่องจากตัวอย่างวัสดุก่อรับค่ากำลังรับแรงอัดได้ไม่มากนัก มีค่าเท่ากับ 25.1 กก./ซม.^{2}

การศึกษานี้แสดงตัวอย่างการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ มาจัดทำข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติ และประเมินสภาพปัจจุบันของอาคารโบราณสถานภายในวัดราชบพิธฯ พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของเศษวัสดุก่อโบราณที่ได้จากการบูรณะ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้ การใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ในการเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของโบราณสถานทำให้ได้ข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติ เป็นจำนวนมากที่มีค่าแม่นยำและสวยงามง่ายต่อการนำมาประยุกต์ใช้ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสำรวจแนวทางอื่น ๆ สำหรับงานที่ต้องการจำนวนพิกัดข้อมูลจำนวนมากที่เท่ากันแล้ว จะพบว่าการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติสามารถดำเนินการได้รวดเร็ว และแม่นยำกว่าวิธีการสำรวจด้วยวิธีการอื่นเป็นอย่างมาก การวิเคราะห์ขนาดมิติมีความถูกต้องแม่นยำ แม้ในจุดที่มีการเข้าถึงยากของเครื่องมือวัด เช่นยอดองค์พระเจดีย์ ทั้งยังสามารถทำแผนผังระดับเพื่อตรวจเช็ค ระดับของพื้น ณ ตำแหน่งใด ๆ ได้ทั้งสิ้น จากข้อมูลที่ได้ศึกษาองค์พระเจดีย์และฐานไพทีมีแนวโน้มทรุดเอียงไปในทิศทางเดียวกันคือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งข้อมูลนี้จะต่อยอดเป็นฐานข้อมูลดิจิทัลในการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างอาคารพร้อมทั้งประกอบการศึกษาวิจัยต่อไปได้ในอนาคต นอกจากนี้การศึกษานี้ได้นำเศษวัสดุอิฐโบราณของวัดราชบพิธฯ ทดสอบหาสมบัติวัสดุก่อ ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้ ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 19.97 ค่าความพรุนร้อยละ 32.10 ค่าการระเหย 12.29 กรัม/ชั่วโมง/ตร.ม. ความหนาแน่น 1396 กก./ม.^{3} และค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 25.1 กก./ซม.^{2}

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และได้รับความร่วมมือจาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรมศิลปากร สำนักงานทรัพย์สินพระมหากษัตริย์ วัดราชบพิธสถิตมหาสีมารามราชวรวิหาร และบริษัท ป.ว.ช. ลิขิตการช่าง จำกัด

[1] ราชกิจจานุเบกษา,ประกาศกระทรวงธรรมการแผนกกรมสังฆการี. (2458). จัดระเบียบพระอารามหลวง, เล่ม ๓๒, ตอน 0 ก, , หน้า 289

[2] González, j.a., Rodríguez, B.R., Aguilera, D.G. and Brea, M.T.R. (2010). Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. Journal of Archaeological Science Volume 37, Issue12, December 2010, pp. 3037-3047

[3] Pritchard, D., Sperner, J., Hoepner, S. and Tenschert, R. (2017). *Terrestrial laser scanning for heritage conservation: the Cologne Cathedral documentation project*. 26th International CIPA Symposium 2017. 28August–01 September 2017, Ottawa, Canada, pp. 213-219.

[4] Noor, N.M., Kamaruddin, Z., Abdullah, A., Abdullah, A.A., Eusoff, S.S. and Mustafa, M.H. (2018). *Using terrestrial laser scanner for Malay heritage documentation: preliminary approach to Istana Balai Besar, Kelantan*. International Journal of Development and Sustainability, Vol. 7, No. 6, pp. 1886-1897.

[5] Yumin, L., Rong, Z. and Yu, Z. (2013). *THE APPLICATION OF 3D LASER SCANNING IN THE PROTECTION OF GROTTOES AND CARVINGS IN CHINA*. XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France, pp. 705-709.

[6] Guoa, J., Yuanb, L. and Wanga, Q. (2020). *Time and cost analysis of geometric quality assessment of structural columns based on 3D terrestrial laser scanning*. Automation in Construction 110 (2020) 103014, pp.1-14

[7] สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล และ เสน่ห์ มหาผล (2562). *โครงการพัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 9-28

[8] กันตภณ จินทราคา, ณัชภัทร ธีร์ธวัชวงศ์ และ ศิวนนท์ ต้นเกตุ. (2561). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์ สาหรับการจัดทำผังบริเวณของอาคาร. *ปริญญานิพนธ์* วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 6-21.

[9] Ebrahim, M., 2011, *3D Laser Scanner: History, Applications and Future*, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Assiut University, pp. 4-29

[10] Historic England. (2018). *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture*. Swindon. Historic England, pp.2-14

[11] Focus3D X 130 and X 330 Laser Scanners SCENE 5.3 Training Manual, September 2014, pp. 64

[12] Teutonico, J.M. (1988). *A Laboratory Manual for Architectural Conservators*, Via di S. Michele 00153 Rome RM, Italy, pp.35-40.

[13] Teutonico, J.M. (1988). *A Laboratory Manual for Architectural Conservators*, Via di S. Michele 00153 Rome RM, Italy, pp.50-51.

[14] ASTM E96. (1997), *Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Materials*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM.