

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

โบราณสถานและโบราณวัตถุเป็นมรดกวัฒนธรรมที่สำคัญของชาติ ซึ่งประเทศไทยมีอยู่มากมาย โดยเฉพาะสถาปัตยกรรมและองค์พระเจดีย์ จากหลักฐานที่มีอยู่เชื่อว่าประเทศไทยเริ่มสร้างโบราณสถานที่เป็นสถูปและเจดีย์มาตั้งแต่สมัยพระเจ้าอโศกมหาราชแห่งอินเดียในช่วงศตวรรษที่ 3 (พ.ศ. 201 - 300) องค์พระเจดีย์ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่และสูง โครงสร้างส่วนใหญ่ใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างหลักตั้งแต่ในระดับฐานจนถึงยอด ศิลปะโบราณวัตถุเหล่านี้เป็นร่องรอยแห่งอดีตกาลที่บ่งบอกถึงวิถีชีวิตและความเป็นมาของบรรพบุรุษชาติไทย ซึ่งสิ่งเหล่านี้เราไม่สามารถที่จะสร้างขึ้นใหม่ให้เหมือนเดิมหรือหาสิ่งอื่นมาทดแทนได้

ปัจจุบัน โบราณสถานและโบราณวัตถุเหล่านี้กำลังถูกทำลายจากกระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพ เนื่องมาจากผ่านกาลเวลามานานหลายร้อยปีและล้วนแต่ตั้งอยู่กลางแจ้ง จึงทำให้เกิดการผุกร่อนอย่างรวดเร็ว ทั้งจากการกระทำของธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ สาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนตลอดเวลาและทุกสถานที่คือก๊าซซัลฟิว ซึ่งก๊าซซัลฟิวที่มีบทบาทในการเกิดกระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพมากที่สุด ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำในอากาศไม่ว่าในรูปของความชื้นหรือน้ำฝนจะเกิดเป็นกรดกำมะถัน ซึ่งกรดเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในวัสดุ ทำให้สามารถกัดกร่อนวัตถุได้ทุกชนิด ทั้งนี้ระดับความรุนแรงที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโบราณสถานและโบราณวัตถุ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดกำมะถันและระยะที่ได้รับหรือสัมผัสก๊าซซัลฟิว หากได้รับกรดกำมะถันที่มีความเข้มข้นสูงแม้จะได้รับในเวลาสั้นๆ ก็ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้มาก หรือหากได้รับกรดกำมะถันที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่ได้รับสัมผัสเป็นเวลานาน ก็ทำให้เกิดความเสียหายได้มากเช่นกัน

กระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพด้วยสาเหตุข้างต้นนั้น มีผลทำให้อิฐซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างหลัก มีความสามารถในการรับกำลังอัดลดลงตามกาลเวลา ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการศึกษาดูกำลังรับแรงอัดของอิฐที่เสื่อมสภาพจากกรดกำมะถันซึ่งเป็นปัจจัยหลัก เพื่อนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการประยุกต์ใช้ในการวางแผนบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานที่สร้างขึ้นจากอิฐได้ต่อไป แต่ในปัจจุบันนี้ในประเทศไทยยังไม่มีอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนของอิฐโดยตรง และปฏิกิริยาการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมจริงนั้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้า อาจนานเป็นเดือน ปี หรือ

หลายปี แต่การทดสอบการกักกร่อนต้องการผลภายในเวลารวดเร็ว เพราะฉะนั้นจึงต้องร่นระยะเวลาของการเกิดการกักกร่อน โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือการเพิ่มความเข้มข้นของสารกักกร่อนให้เข้มข้นมากขึ้น

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 การเสื่อมสภาพของโบราณสถานและโบราณวัตถุ

ภักดี [10] ได้ทำการศึกษาหาสาเหตุของการผุกร่อนและการกักกร่อนของโบราณสถานและโบราณวัตถุ เพื่อใช้ในการอนุรักษ์และหยุดยั้งการชำรุดเสื่อมสภาพของวัตถุ จากการศึกษาพบว่าสาเหตุที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการชำรุดทรุดโทรมเสื่อมสภาพมาจากองค์ประกอบ 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 เกิดจากสิ่งแวดล้อม ปัจจัยที่มีผลต่อการผุกร่อนและกักกร่อนมากที่สุดคือ น้ำฝน ความชื้น ความร้อน แสงสว่าง ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ ฝุ่นละออง เกลือ พืช และจุลินทรีย์

กลุ่มที่ 2 เกิดจากจุดอ่อนในตัววัตถุเอง อุณหภูมิและความสามารถในการดูดและคาย ความชื้นของตัววัตถุเอง เป็นปัจจัยที่สำคัญของการชำรุดทรุดโทรมเสื่อมสภาพ โดยอุณหภูมิและความชื้นที่แปรเปลี่ยนขึ้นๆ ลงๆ ตลอดเวลา ทำให้วัตถุหลายชนิดมีการหดตัวและขยายตัวสลับกันไปเรื่อยๆ นานๆ เข้าวัตถุจะเกิดการแตกร้าว โกงงอ บิดเบี้ยว หรือกะเทาะแยกหลุดออกจากกันได้

กลุ่มที่ 3 เกิดจากการกระทำของมนุษย์และสัตว์ มนุษย์เป็นสาเหตุทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุชำรุดทรุดโทรมโดยไม่รู้ตัว โดยเกิดจากการสัมผัสเทียนของยานพาหนะ เครื่องจักร เครื่องยนต์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้าง การระเบิด ฯลฯ ส่วนการกระทำของสัตว์ก็มีความเสียหายไม่แพ้กัน โดยเฉพาะภูมิภาคที่มีอากาศร้อนและชื้นเกือบตลอดปีเช่นประเทศไทย สัตว์จำพวกแมลงจึงมีบทบาทสำคัญที่สุดที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการชำรุดเสื่อมสภาพ แมลงเหล่านี้มักจะกัดกินเนื้อวัตถุเป็นอาหาร เกิดช่องโหว่รูพรุนฉีกขาดหรือพังทลายได้

จิราภรณ์ [2] ทำการศึกษาหาสาเหตุและกระบวนการที่แท้จริงที่ทำให้อิฐและหินบนโบราณสถานชำรุดผุเปื่อย โดยพิจารณาปฏิกิริยาระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ จากการตรวจสอบด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์พบว่า ปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการผุกร่อนของโบราณสถานนั้นเกิดขึ้นจากเกลือและน้ำ โดยเกลือสามารถทำปฏิกิริยากับโบราณสถานได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเกลือที่ละลายน้ำได้ดี ซึ่งจะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุที่มีรูพรุนแล้วสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัตถุ เมื่อใดที่ความชื้นลดลง น้ำจะระเหยออกไปตรงผิวของวัตถุ เมื่อน้ำที่ผิววนออกสุดระเหยออกไป น้ำจากส่วนที่อยู่ถัดเข้าไปข้างในก็จะเคลื่อนตัวมาแทนที่ น้ำดังกล่าวจะพาเกลือที่

ละลายน้ำได้มาด้วย เมื่อน้ำระเหยไป เกลือระเหยไม่ได้จึงมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับหนึ่งซึ่งเป็นจุดอิ่มตัวของสารละลายของเกลือนั้น เกลือจะตกผลึกอยู่ภายในเนื้อวัตถุนั้นๆ การตกผลึกจะเกิดมากตรงผิวของวัตถุที่มีอัตราการระเหยสูง เมื่อใดที่มีความชื้นสูงขึ้นเกลือจะดูดความชื้นแล้วกลายเป็นสารละลายอีก และจะตกผลึกเมื่อความชื้นลดลง เป็นเช่นนี้ซ้ำแล้วซ้ำเล่า ตลอดเวลาผลึกเกลือจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนในที่สุดจะขยายขนาดคันช่องว่างและรูพรุนภายในเนื้อวัตถุแตกออก โดยเกลือเหล่านี้มีแหล่งที่มาจากเกลือที่เป็นองค์ประกอบของดินเอง เกลือที่มาจากน้ำใต้ดิน เกลือที่มีอยู่ในเนื้อวัตถุ และเกลือที่มาจากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะก๊าซซัลฟิวซ์ ก๊าซที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการเสื่อมสภาพของโบราณสถาน ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นั่นคือเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เมื่อทำปฏิกิริยากับวัตถุโดยเฉพาะที่มีสารประกอบคาร์บอเนตจะกลายเป็นเกลือซัลเฟต ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สำคัญมากในการเสื่อมสภาพของวัตถุ ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาตราบใดที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปะปนอยู่ในอากาศ และปฏิกิริยานี้จะทวีความรุนแรงในที่ที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปะปนอยู่มาก แม้ในอากาศที่บริสุทธิ์ก็มีก๊าซเหล่านี้อยู่ แต่มีเพียงเล็กน้อย ปฏิกิริยาจึงยังคงเกิดอย่างช้าๆ ทีละน้อยๆ อย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไปนานเข้าวัตถุจะสึกกร่อนและปริมาณเกลือก็จะสูงขึ้นเรื่อยๆ

Kuchitsu et al., [28] ได้ทำการศึกษาการเกิดเกลือในอิฐที่ทำให้โบราณสถานเกิดความชำรุดเสียหายตามสภาพอากาศของจังหวัดอยุธยา ทำการทดสอบโดยใช้อิฐที่จังหวัดอยุธยาถือเป็นเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 35×35 ซม. สูง 1 ม. จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยที่เสาตัวอย่างแรกทำการฉาบปูนปิดผิวหน้าของอิฐทั้งหมด ส่วนเสาตัวอย่างที่สองไม่ได้ฉาบปูนปิดผิวหน้าของอิฐ จากนั้นปล่อยให้เสาตัวอย่างทั้งสองให้สัมผัสสภาพอากาศตามฤดูกาลของจังหวัดอยุธยา จากการศึกษาพบว่าเสาตัวอย่างแรกมีความชื้นมากกว่า และในฤดูหนาวจะเกิดเกลือในเสาตัวอย่างที่ไม่ได้ฉาบปูนมากกว่าอย่างชัดเจน จากการตรวจสอบสารประกอบในอิฐด้วยเครื่อง XRD (ตาราง 1.1) พบว่ามีสารประกอบที่เป็นเกลือเกิดมากในฤดูที่ไม่มีฝน และยังได้ทำการสังเกตบริเวณกำแพงของโบราณสถานที่จังหวัดอยุธยาพบว่า ช่วงสิ้นสุดหน้าฝนกำแพงของโบราณสถานยังไม่เกิดเกลือขึ้น แต่หลังจากนั้น 1 อาทิตย์ เมื่อเริ่มเข้าต้นหนาวจะสังเกตเห็นเกลือจำนวนมากเกาะอยู่ที่อิฐ ซึ่งจากการสังเกตและจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ความเสียหายของอิฐก่อของโบราณสถานที่เกิดจากการกัดกร่อนของเกลือในจังหวัดอยุธยาจะเกิดเป็นฤดู คือจะเริ่มเกิดความเสียหายเมื่อเริ่มเข้าหน้าหนาวจนกระทั่งถึงหน้าฝน และโบราณสถานบริเวณที่ฉาบปูนยังมีความสมบูรณ์ อิฐก็จะไม่เกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนของเกลือ

ตาราง 1.1 เกลือโนผิววัสดุที่สัมผัสสภาพอากาศตามฤดูกาลของจังหวัดอยุธยา [28]

Sample	Main component minerals
Red brick	Quartz (SiO ₂), pyroxene ((Ca,(Mg,Fe)) ₂ Si ₂ O ₆), feldspar (((K,Na),Ca)(Al,Si) ₂ Si ₂ O ₈)
Black brick	Quartz (SiO ₂), cristobalite (SiO ₂), mullite (Al ₂ (Al,Si) ₄ O ₁₀)
Mortar	Calcite (CaCO ₃), quartz (SiO ₂)
Salts of the dry season	Thenardite (Na ₂ SO ₄), halite (NaCl), darapskite (Na ₃ (NO ₃)(SO ₄)·H ₂ O), eugsterite (Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ ·2H ₂ O), konyaite (Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·5H ₂ O), wattervilleite (Na ₂ Ca(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O), bloedite (Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O), gypsum (CaSO ₄ ·2H ₂ O), calcite (CaCO ₃)
Salts of the rainy season	Gypsum (CaSO ₄ ·2H ₂ O), calcite (CaCO ₃)

1.2.2 ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และกรดกำมะถันต่อวัตถุ

พัชรวิไล [8] ได้ทำการศึกษาการกัดกร่อนและสร้างสมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของวัตถุ 4 ชนิด ได้แก่ อิฐเก่า อิฐปัจจุบัน ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน โดยทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือเพื่อสร้างสถานะสมมติในการทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่ง โดยให้วัตถุสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 10 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้ตัวอย่างทดสอบของวัตถุทั้ง 4 ชนิดขนาด 2.5 × 2.5 × 2.5 เซนติเมตร แล้วทำการศึกษาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ได้แก่ ศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัตถุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบองค์ประกอบภายในด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และทำการหาน้ำหนักที่หายไป เพื่อนำไปคำนวณอัตราการกัดกร่อนจากผลการทดลองพบว่าหลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีเกลือซัลเฟตเกิดขึ้นบนวัตถุ และวัตถุมีน้ำหนักหายไป โดยอัตราการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, เวลาในการสัมผัส และ ชนิดของวัตถุ ซึ่งวัตถุที่สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง จะเกิดการกัดกร่อนสูง โดยวัตถุที่เกิดการกัดกร่อนมากที่สุด ได้แก่ ปูนปั้นเก่า, ปูนปั้นปัจจุบัน, อิฐเก่า และ อิฐปัจจุบัน ตามลำดับ และระยะเวลาที่สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยิ่งนานก็ยิ่งเกิดการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

อิฐเก่า $C.T. = (2.798 \times 10^{-3}) + (9.419 \times 10^{-5})C + (2.973 \times 10^{-3})T$

อิฐปัจจุบัน $C.T. = (3.238 \times 10^{-3}) + (2.055 \times 10^{-5})C + (4.427 \times 10^{-4})T$

ปูนปั้นเก่า $C.T. = (-1.080 \times 10^{-2}) + (7.720 \times 10^{-4})C + (5.590 \times 10^{-2})T$

ปูนปั้นปัจจุบัน $C.T. = (-6.501 \times 10^{-3}) + (5.059 \times 10^{-4})C + (2.205 \times 10^{-2})T$

โดยที่ C.T. คือ อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซนต์
 C คือ ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน
 T คือ เวลา, สัปดาห์

ฟองจันทร์ [9] ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์ และเถ้านหินที่ได้จากการแยกขนาดและเถ้านหินหยาบบดละเอียดในส่วนผสมมอร์ตาร์ต่อการกัดกร่อนของสารละลายกรดกำมะถันที่มีค่าความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยใช้เถ้านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดโดยการคัดแยกขนาดและการบดละเอียดจำนวน 5 ขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมอร์ตาร์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก และแปรอัตราส่วนของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์กับเถ้านหิน) ต่อทรายที่ 1:1.75, 1:2.75 และ 1:3.75 ทำการหล่อมอร์ตาร์รูปลูกบาศก์มาตรฐานขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. ที่มีค่าการไหลอยู่ระหว่าง 105 ถึง 115 และถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน โดยแบ่ง ตัวอย่างทดสอบออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และกลุ่มที่สองนำไปแช่ในสารละลายกรดกำมะถันที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3, 0.2 และ 0.02 โดยน้ำหนักซึ่งเทียบเท่ากับระดับ pH ที่ 0.5, 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ เพื่อศึกษาน้ำหนักที่สูญเสียของมอร์ตาร์อันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของกรดกำมะถันที่แช่ในสารละลายเป็นเวลา 1, 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ผลการศึกษาพบว่าเถ้านหินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้มีขนาดละเอียดจะให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานในบางอัตราส่วนผสม และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้านหิน

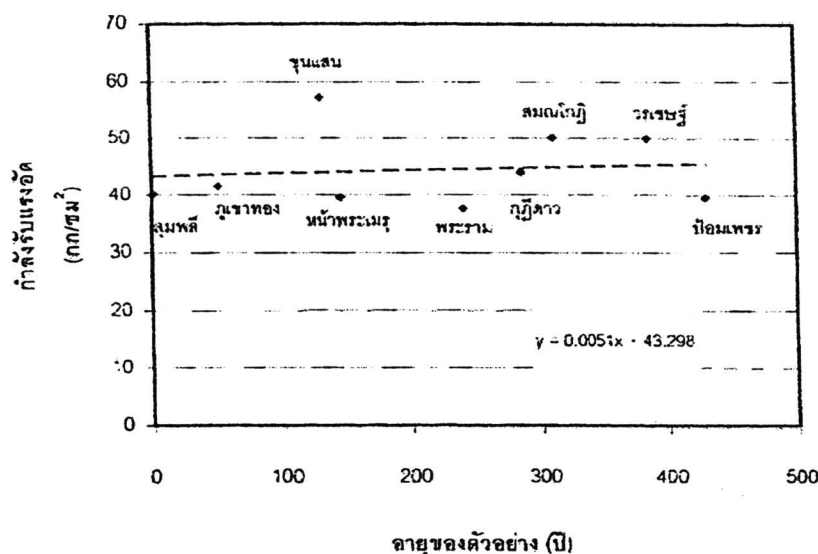
การกัดกร่อนพบว่าการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นตามความเข้มข้นของกรดที่สูงขึ้น แต่มีลักษณะการกัดกร่อนในแต่ละอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยพบว่าการลดปริมาณวัสดุประสานประกอบกับการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินสามารถลดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงของสารละลายกรดเข้มข้นสูงได้เป็นอย่างดี

ประชุม [7] ศึกษาการถูกกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่ใช้หินฝุ่นแทนทรายและมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายเนื่องจากสารละลายกรดกำมะถัน โดยใช้หินฝุ่นแทนทรายร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.45 นำตัวอย่างมอร์ตาร์บ่มในน้ำ 28 วัน แล้วแช่ในสารละลายกรดกำมะถันความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้หินฝุ่นแทนทรายสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่ามอร์ตาร์ปกติ

1.2.3 สมบัติของอิฐโบราณและอิฐดินเผา

ศุคชาย [14] ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการรับแรงของอิฐโบราณและอิฐที่ใช้ในการบูรณโบราณสถาน โดยใช้ตัวอย่างทดสอบจำนวน 9 แห่ง เป็นอิฐโบราณที่เก็บตัวอย่างมาจากแหล่งโบราณสถานในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา 8 แห่ง อิฐที่มีการผลิตในปัจจุบันที่บ้านลุมพลี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 1 แห่ง และนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ประธานโบราณสถานวัดกุฎีขาวเป็นกรณีศึกษา จากการทดสอบและการวิเคราะห์โครงสร้างสรุปได้ว่า

1. กำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐตัวอย่างขนาดประมาณ $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ทั้ง 9 แห่ง มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่กำลังรับแรงอัดที่ไม่เกี่ยวข้องกับความลึกจากผิวหน้าของอิฐมีค่าเฉลี่ยในระดับ 43 ถึง 46 กก./ตร.ซม. ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลาดังรูป 1.1 และโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 32,000 ถึง 35,000 กก./ตร.ซม. นอกจากนั้น จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของอิฐที่มีอายุตั้งแต่ 1 ถึง 430 ปี พบว่าอิฐก่อภายในมีคุณสมบัติค่อนข้างคงที่ แต่อิฐก่อภายนอกแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการเสื่อมสภาพ



รูป 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังรับแรงอัดของอิฐจากแหล่งต่างๆ ในเขตจังหวัด

พระนครศรีอยุธยา

ที่มา : ศุคชาย [14]

2. การวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ประธานของวัดกุฎีขาว เพื่อศึกษาถึงการกระจายหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักขององค์เจดีย์ในกรณีที่ไม่มีแรงต่อเติมองค์ระฆังและปล้องโถง พบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับองค์เจดีย์ทั้งหน่วยแรงในแนวตั้งและหน่วยแรงในแนวราบเป็นหน่วยแรงอัด โดยมีหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณฐาน และหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินกำลังรับแรงอัดของอิฐ

3. เมื่อต่อเติมโครงสร้างส่วนบนขององค์เจดีย์ตามรูปแบบสันนิษฐาน พบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งเป็นหน่วยแรงอัด มีค่าสูงสุดบริเวณฐานและไม่เกินกำลังรับแรงอัดของอิฐ แต่จะเกิดหน่วยแรงดึงในแนวราบบริเวณส่วนบนที่ต่อเติมและบริเวณฐาน หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่มากนัก แต่อาจทำให้องค์เจดีย์เริ่มแตกร้าว โดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งรอยต่อระหว่างอิฐกับปูนก่อ

วรัทต์ดี [11] ได้วิเคราะห์ถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นของเจดีย์โบราณสถานเนื่องจากคลื่นความสั่นสะเทือนของการจราจรบริเวณใกล้เคียงกับองค์พระปฐมเจดีย์ โดยทำการวิเคราะห์องค์พระปฐมเจดีย์ที่จังหวัดนครปฐม จากการนำเอาชิ้นส่วนก้อนอิฐและปูนประสานมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าคุณสมบัติที่สำคัญ คือ กำลังอัดประลัยของก้อนอิฐและปูนประสาน มีค่าประมาณ 60 และ 25 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ แล้วนำมาใช้คำนวณหา กำลังอัดประลัยของวัสดุก่อโดยรวมของก้อนอิฐและปูนประสาน (ตามข้อกำหนด BS CODE 5628, 1978) จะได้ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 28.21 กก./ตร.ซม. โมดูลัสยืดหยุ่นได้ค่าเท่ากับ 28,210 กก./ตร.ซม. คุณสมบัติ Poisson's Ratio เท่ากับ 0.216 และน้ำหนักจำเพาะได้ค่าเท่ากับ 1,760 กก./ตร.ซม. ผลจากการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ทางพลศาสตร์สามารถสรุปได้ว่า การสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรบริเวณใกล้เคียงกับองค์พระปฐมเจดีย์ ไม่มีผลที่เป็นนัยสำคัญต่อความมั่นคงขององค์พระปฐมเจดีย์ คือจะไม่เป็นเหตุทำให้องค์พระปฐมเจดีย์เกิดการวิบัติโดยฉับพลันได้ แต่แรงดึงที่เกิดขึ้นจากการโยกตัวของปล้องโถงเนื่องจากการสั่นสะเทือน อาจเป็นสาเหตุทำให้จุดอ่อนบริเวณปล้องโถงเกิดการแตกร้าวของปูนประสานเพิ่มมากขึ้นมากกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน และสามารถขยายตัวไปบริเวณใกล้เคียงจนทำให้อายุขององค์พระปฐมเจดีย์สั้นลงเรื่อยๆ

อดิษฐ์ [15] ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์และคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างโบราณสถาน โดยใช้ข้อมูลทางการศึกษาจากเจดีย์วัดกุฎีขาว ซึ่งประกอบด้วยอิฐที่ใช้ในการบูรณะองค์เจดีย์ รูปร่างฐานขององค์เจดีย์ ซึ่งนำอิฐก่อที่ใช้ในการบูรณะโบราณสถานมาทำการทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง จากการทดสอบได้ค่าคุณสมบัติโดยเฉลี่ยของทุกตัวอย่างดังต่อไปนี้

โมดูลัสยืดหยุ่น	=	30,800	กก./ซม. ²
กำลังรับแรงอัด	=	40	กก./ซม. ²
อัตราส่วนปัวซอง	=	0.21	
โมดูลัสของแรงเฉือน	=	12,727.27	กก./ซม. ²

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นไหวด้านข้างที่หนึ่ง มีค่า 1.7595 Hz.

Gumaste et al., [23] ทำการทดสอบหาคำกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของปริซึมอิฐก่อและ
กำแพงอิฐก่อ โดยสร้างสมการประมาณค่าจากกำลังรับแรงอัดของก้อนอิฐกับมอร์ตาร์ อิฐที่ใช้ใน
การทดสอบมี 2 ชนิด คือ Table Moulded Bricks ขนาด 228 × 108 × 75 มม. และ Wire-Cut Bricks
ขนาด 235 × 111 × 75.5 มม. ของประเทศอินเดีย ประสานรวมกับมอร์ตาร์ 5 สูตร โดยก่อเป็น
ปริซึมแบบ Stack Bonded, English Bonded และก่อเป็นกำแพงแบบ Stretcher Bonded, English
Bonded เมื่อทำการทดสอบ พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐทั้ง 2 ชนิดมีค่าดังตาราง 1.2

ตาราง 1.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของปริซึมอิฐก่อและกำแพงอิฐก่อ [23]

ชนิดของอิฐ	โมดูลัสยืดหยุ่น ของปริซึมอิฐก่อ	โมดูลัสยืดหยุ่น ของกำแพงอิฐก่อ
Table Moulded Bricks	345 – 467 MPa.	260 – 735 MPa.
Wire-Cut Bricks	2393 – 3789 MPa.	4824 – 5232 MPa.

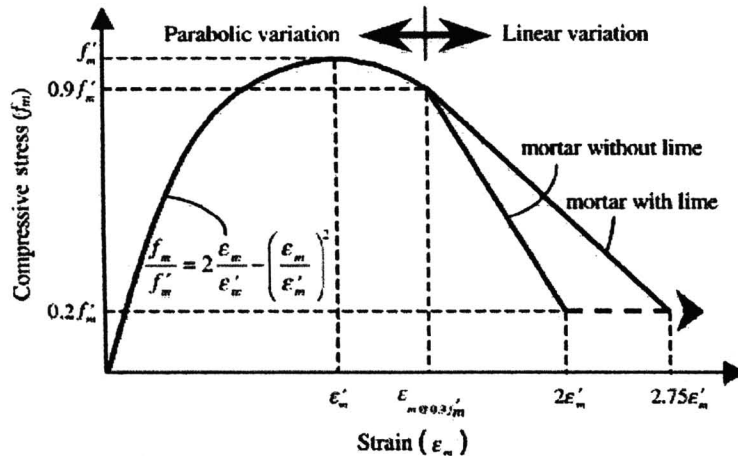
ค่ากำลังอัดของปริซึมอิฐก่อเป็นไปตามสมการดังนี้

Stack Bonded Prism $f = 0.317(f_b)^{0.866}(f_m)^{0.134}$

English Bonded Prism $f = 0.317(f_b)^{0.866}(f_m)^{0.134}$

โดยที่ f คือ กำลังอัดสูงสุดของปริซึมอิฐก่อ
 f_m คือ กำลังอัดของอิฐ
 f_b คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์

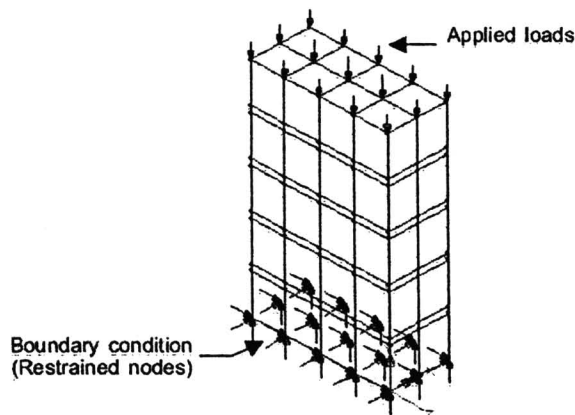
Kaushik et al., [27] ทำการศึกษาและจำลองความสัมพันธ์ Stress – Strain ของอิฐก่อดิน
เผาภายใต้แรงอัดตามแนวแกน จำนวน 84 ตัวอย่าง โดยใช้อิฐดินเผาจาก 4 โรงงาน ขนาดอิฐยาว
210 มม. กว้าง 110 มม. สูง 75 มม. ก่อเป็นปริซึมแบบ Stack Bonded ประสานรวมกับมอร์ตาร์ 3
สูตรที่มีความหนา 10 มม. ผลการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ Stress – Strain มีจุดควบคุมอยู่ 6 จุด
แต่เพื่อให้ง่ายขึ้นสามารถจำลองเป็นแบบ Tri-Linear Stress-strain ได้ดังรูป 1.2



รูป 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของอิฐก่อ

ที่มา : Kaushik et al., [27]

Bakhteri et al., [19] ได้วิเคราะห์ปริซึมอิฐก่อดินเผาภายใต้แรงกดตามแนวแกนโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อิฐที่ใช้วิเคราะห์มีขนาดยาว 212 มม. กว้าง 92 มม. สูง 66 มม. จำลองโดยการกำหนดความหนาของมอร์ต้าร์ออกเป็น 5 ขนาด คือ 7.5, 10, 12.5, 15 และ 20 มม. ทำการแบ่งปริซึมออกเป็น 72 อิลลิเมนต์ การยึดปลายด้านล่างของปริซึมจะยึดทุกแกน ส่วนแรงกดตามแนวแกน จะใช้แรงกดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจริง ใส่ค่าเฉพาะโหนดที่อยู่ด้านบนสุด ดังรูป 1.3

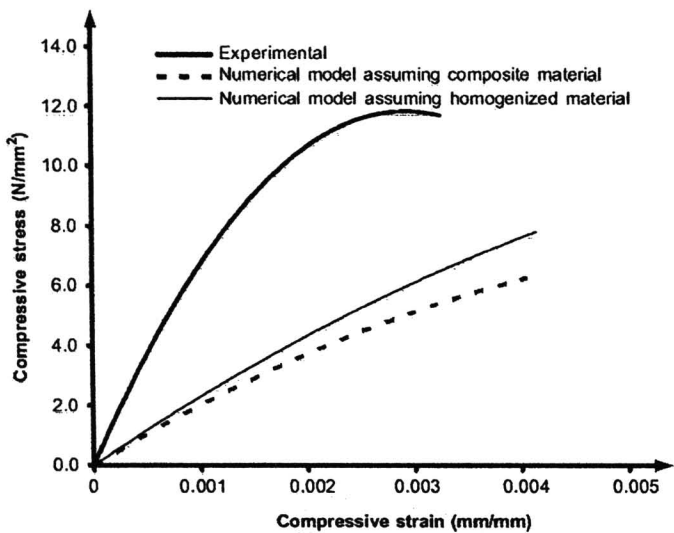


รูป 1.3 รูปแบบการใส่แรงและเงื่อนไขที่จู่รองรับในการวิเคราะห์ปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Bakhteri et al., [19]

การวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของปริซึมที่มีคุณสมบัติของวัสดุ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 กำหนดให้อิฐและมอร์ต้าร์มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน และ กรณีที่ 2 ให้อิฐและมอร์ต้าร์มีคุณสมบัติต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ 1 มีค่ากำลังอัดสูงกว่ากรณีที่ 2

เล็กน้อย แต่ทั้งสองกรณีมีน้อยกว่าผลการทดสอบจริงประมาณ 50% และจากการทดสอบจริงพบว่า ปริซึมที่มีความหนาโมร์ดาร์ 7.5 มม. มีค่ากำลังอัดสูงสุด ดังรูป 1.4



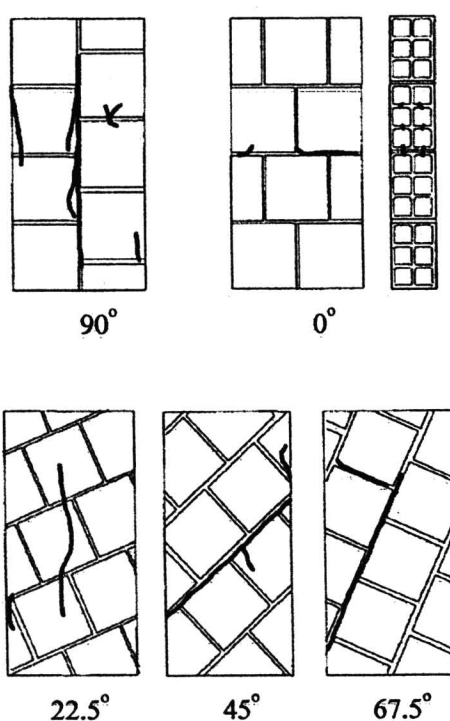
รูป 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของความหนาโมร์ดาร์ 7 มม.
ที่มา : Bakhteri et al., [19]

Bennett et al., [20] ทำการศึกษาคูณสมบัติด้านการรับแรงอัดของอิฐก่อดินเผา โดยใช้ อิฐก่อสร้างขนาดกว้าง 0.6 ม. × สูง 1.2 ม. × หนา 200 มม. นำมาทดสอบหาลำกำลังอัด โดยก่อในแนว ของรอยต่อระหว่างก้อนอิฐทำมุมต่างๆ คือ 0°, 22.5°, 45°, 67.5° และ 90° (รูป 1.5) โดยใช้โมร์ดาร์ที่มี ส่วนผสมคือ ซีเมนต์โมร์ดาร์ และทราย อิฐก่อมีความหนาแน่น 860 กก./ลบ.ม. จากการทดสอบ ได้ค่ากำลังอัดของอิฐดังตาราง 1.3

ตาราง 1.3 กำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อที่ก่อเอียงทำมุมต่างๆ [20]

Angle with respect to horizontal (°)	Number of prisms	Prisms Strength (MPa.)	
		Mean	COV (%)
0	7	5.58	8
22.5	3	3.65	17
45	3	1.82	23
67.5	3	0.99	43
90	7	3.01	23
Note : COV = Coefficient of variation			

จากการศึกษาข้อมูลพบว่า เมื่ออิฐก่อทำมุมมากขึ้น ค่ากำลังอัดก็จะลดลงเรื่อยๆ แต่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่มุม 90° เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า มุมที่เอียงมากขึ้น ทำให้ปริซึมอิฐก่อมีโอกาสที่จะวิบัติที่มอร์ตาร์มากกว่าก้อนอิฐ ดังรูป 1.5



รูป 1.5 รูปแบบรอยร้าวของปริซึมอิฐก่อทำมุม

ที่มา : Bennett et al., [20]

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อทำนายการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผาตามระยะเวลาจริงของธรรมชาติ ที่ถูกทำลายด้วยกรดกำมะถันซึ่งเป็นปัจจัยหลัก โดยพิจารณาค่ากำลังอัดและอัตราการกัดกร่อน

1.3.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจากผิวหน้าและการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผา ที่ถูกทำลายด้วยกรดกำมะถันซึ่งเป็นปัจจัยหลัก

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการทำนายการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผา สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานที่ยังสร้างจากอิฐดินเผาได้

1.4.2 สามารถใช้ค่ากำลังอัดของวัสดุที่เสื่อมสภาพมาเป็นข้อมูลดิบในการวิเคราะห์กำลังของโครงสร้างโบราณสถานที่ยังสร้างจากอิฐดินเผาได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 อิฐที่ใช้ในการวิจัยเป็นอิฐดินเผาจากท้องถิ่นในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ขนาด กว้าง 6 × ยาว 15 × หนา 3.5 เซนติเมตร

1.5.2 ใช้มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปูนขาวหมักและทรายหยาบ ในอัตราส่วนผสม 1:2 โดย ปริมาตร ที่อ้างอิงจากข้อมูลในการสร้างโบราณสถาน

1.5.3 ใช้กรดกำมะถัน (H_2SO_4) ชนิด Commercial Grade ความเข้มข้นร้อยละ 98

1.5.4 ใช้ปูนขาวสดที่ได้จากการเผาปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต) ลักษณะเป็นผงสีขาว

1.5.5 ใช้ทรายหยาบน้ำจืดที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป

1.5.6 อัตราส่วนความสูงต่อความหนาของปริซึมอิฐก่อนจะใช้ประมาณ 3.5 (ใช้อิฐก่อเรียง กันสูง 5 ก้อน)

1.5.7 ทดสอบการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติของอิฐในสภาพอากาศตามฤดูกาลของจังหวัด เชียงใหม่ช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2552 – เมษายน พ.ศ. 2553 เป็นระยะเวลา 24 สัปดาห์

1.5.8 ทดสอบการเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยาในสภาวะเปียกสลับแห้งเท่านั้น