บทที่ 6
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมจริงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้า อาจนานหลายปี แต่การทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้น ต้องการผลภายในเวลารวดเร็ว ฉะนั้นจึงต้องทำการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา และการจำลองสภาวะจริงในห้องทดลองให้เหมือนกับสภาวะจริงของธรรมชาตินั้นทำได้ยาก ดังนั้นผลการประเมินการเสื่อมสภาพของอิฐในงานวิจัยนี้เกิดขึ้นจากการสัมผัสกรดกำมะถันเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

จากการศึกษาการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผา ที่ถูกทำลายด้วยกรดกำมะถันซึ่งเป็นปัจจัยหลัก โดยการทดสอบแบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ (1) การทดสอบการเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติ (2) การทดสอบการเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยา และ (3) การทดสอบการเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับการเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยา สามารถสรุปผลการวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ (1) ผลการเสื่อมสภาพต่ออัตราการกัดกร่อน (2) ผลการเสื่อมสภาพต่อกำลังรับแรงอัด และ (3) ผลการเสื่อมสภาพต่อสมบัติทางเคมี

6.1.1 ผลการเสื่อมสภาพต่ออัตราการกัดกร่อน

จากการทดสอบอัตราการกัดกร่อน โดยพิจารณาจากน้ำหนักที่หายไปของวัสดุ นำมาคิดเป็นค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป จากผลการทดสอบวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ อิฐดินเผา มอร์ต้าร์ปูนหมัก และปริซึมอิฐก่อ พบว่า มีการกระจายตัวของข้อมูลสูงมาก เนื่องจากอิฐที่ใช้ทดสอบเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในส่วนของมอร์ต้าร์ปูนหมักก็เช่นกัน แต่ก็สามารถสรุปได้ว่าในช่วงแรกของการทดสอบ (ประมาณ 1-12 สัปดาห์) วัสดุมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง (มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น) สังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าเป็นลบ เนื่องจากการตกผลึกของเกลือภายในช่องว่างรูพรุนของเนื้อวัสดุ ทำให้วัสดุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่หลังจาก 12 สัปดาห์ เมื่อเกลือเริ่มเต็มรูพรุน ทำให้วัสดุเริ่มแตกกะเทาะจนทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเริ่มติดลบน้อยลงและอาจจะมีค่าเป็นบวกในที่สุด ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาสามารถเร่งการเกิดเกลือและทำให้อิฐเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าการทดสอบแบบธรรมชาติด้วยกลไกแบบเดียวกัน โดยค่าอัตราการกัดกร่อนเป็นไปตามสมการดังตาราง 6.1

ตาราง 6.1 สมการเส้นแนวโน้มสำหรับพยากรณ์อัตราการกัดกร่อน

วัสดุ	สมการเส้นแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อน***	เทียบระยะเวลาตามจริง**	ช่วงเวลาตามจริงที่สามารถพยากรณ์ได้*
อิฐดินเผา	$WL = 0.0227Ta^2 - 0.5038Ta - 0.8478$	$Tn = 51.83\ Ta$	25.9 ปี
มอร์ต้าร์ปูนหมัก	$WL = 0.0421Ta^2 - 1.0913Ta - 0.038$	$Tn = 3.12\ Ta$	1.6 ปี
ปริซึมอิฐก่อ	$WL = -0.0074Tn + 0.0088$	–	7.4 ปี

หมายเหตุ : *** ภายใต้การทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาในสภาวะเปียกสลับแห้ง สัมผัสกับกรดกำมะถันความเข้มข้นร้อยละ 3 ในระยะเวลา 24 สัปดาห์

** เทียบจากการทดสอบรูปแบบที่ 2 กับ 3 , * อ้างอิงจากการทดสอบรูปแบบที่ 3

WL คือ อัตราการกัดกร่อน (Weight Loss), เปอร์เซ็นต์

Ta คือ ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา (Acceleration Time), สัปดาห์

Tn คือ ระยะเวลาตามจริง (Natural Time), สัปดาห์

6.1.2 ผลการเสื่อมสภาพต่อกำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ อิฐดินเผา มอร์ต้าร์ปูนหมัก และปริซึมอิฐก่อ พบว่า มีทิศทางของเส้นแนวโน้มตรงข้ามกับผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อน คือ ในช่วงแรกของการทดสอบ (ประมาณ 1-12 สัปดาห์) วัสดุมีค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดเกลือในเนื้อวัสดุช่วยส่งถ่ายแรงในช่องว่างรูพรุน ทำให้วัสดุมีพื้นที่รับแรงมาก จึงส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่หลังจาก 12 สัปดาห์ เมื่อผลึกเกลือโตขึ้นจนเต็มรูพรุนและมีแรงดันทำให้เนื้อวัสดุแตกกะเทาะ ทำให้วัสดุมีพื้นที่รับแรงน้อยลง จึงเริ่มมีกำลังรับแรงอัดน้อยลงจนเข้าใกล้ศูนย์ สำหรับการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดเป็นไปตามสมการดังตาราง 6.2

ผลการพยากรณ์เวลาที่เหมาะสมในการทำนุบำรุง ($\bar{T}_{allow}$) ที่ได้ในงานวิจัยนี้ จะได้เวลาการซ่อมบำรุงที่เร็วกว่าเวลาการซ่อมบำรุงจริง เนื่องจากในการคำนวณจะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ (SF = 5) ดังรูป 5.5 ซึ่งอิฐยังไม่เกิดการเสื่อมสภาพและยังสามารถรับแรงอัดได้อยู่ แต่ในการบูรณะโบราณสถานจริง จะไม่มีการวางแผนเวลาที่แน่นอน โดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น งบประมาณ การตรวจเช็คของผู้ดูแล ฯลฯ โบราณสถานหลายแห่งทำการบูรณะที่อายุมากกว่า 50 ปี ซึ่งการบูรณะส่วนใหญ่จะทำเมื่อเกิดการเสียหายกับอิฐโครงสร้างของโบราณสถานแล้ว อย่างไรก็ตาม การทำนุบำรุงโบราณสถานตามระยะเวลาอันสมควรอย่างมีระบบย่อมเป็นผลดีกว่าเกิดความเสียหายแล้วทำการบูรณะ แต่ช่วงเวลาตามจริงที่สามารถพยากรณ์ได้จากงานวิจัยนี้ยังไม่นานพอ ดังนั้นถ้าจะให้สมการมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์มากขึ้น ควรมีการทดสอบมากกว่า 24 สัปดาห์

ตาราง 6.2 สมการเส้นแนวโน้มสำหรับพยากรณ์กำลังรับแรงอัด

วัสดุ	สมการเส้นแนวโน้มของกำลังรับแรงอัด***	เทียบระยะเวลาตามจริง**	ช่วงเวลาตามจริงที่สามารถพยากรณ์ได้*
อิฐดินเผา	$\sigma = -0.3472Ta^2 + 8.1178Ta + 32.199$	Tn = 19.32 Ta	9.6 ปี
มอร์ต้าร์ปูนหมัก	$\sigma = -0.1106Ta^2 + 2.332Ta + 7.7127$	Tn = 2.08 Ta	1.04 ปี
ปริซึมอิฐก่อ	$\sigma = 0.2182Tn + 35.146$	–	1.4 ปี

หมายเหตุ : *** ภายใต้การทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาในสภาวะเปียกสลับแห้ง สัมผัสกับกรดกำมะถันความเข้มข้นร้อยละ 3 ในระยะเวลา 24 สัปดาห์

** เทียบจากการทดสอบรูปแบบที่ 2 กับ 3 , * อ้างอิงจากการทดสอบรูปแบบที่ 3

σ คือ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength), กก./ตร.ซม.

Ta คือ ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา (Acceleration Time), สัปดาห์

Tn คือ ระยะเวลาตามจริง (Natural Time), สัปดาห์

ส่วนกำลังอัดของชิ้นตัวอย่างขนาดเล็ก ซึ่งทำการเคลือบด้วยอีพ็อกซี่เพื่อเกิดการเสื่อมสภาพด้านเดียว พบว่ามีความสอดคล้องกับตัวอย่างที่ไม่เคลือบอีพ็อกซี่ คือ มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และจะมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงในระยะยาว ซึ่งการเสื่อมสภาพของอิฐและมอร์ต้าร์ขึ้นอยู่กับความลึกจากผิวสัมผัสและเวลา โดยที่กำลังอัดที่ผิวนอกสุดจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป

6.1.3 ผลการเสื่อมสภาพต่อสมบัติทางเคมี

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างภายใน (SEM) และวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุ (EDS) ของอิฐดินเผาหลังจากการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีสารประกอบซัลเฟอร์และมีผลึกเกลือซัลเฟตเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ในส่วนของมอร์ต้าร์ไม่ตรวจพบผลึกเกลือและสารประกอบซัลเฟอร์ ส่วนผลการวิเคราะห์องค์ประกอบภายใน (XRD) ของอิฐดินเผาและมอร์ต้าร์ พบว่า มีเกลือยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เกิดขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษากลไกการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผายังอยู่ในขอบเขตที่จำกัด ซึ่งกระบวนการเสื่อมสภาพจริงของธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ และการจำลองสภาวะจริงในห้องทดลองให้เหมือนกับสภาวะจริงของธรรมชาตินั้นทำได้ยากมาก แต่เพื่อให้ทราบกลไกการเสื่อมสภาพที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงที่สุด หรือเลียนแบบให้เป็นไปได้มากที่สุด จึงควรมีการศึกษา

การเสื่อมสภาพของอิฐดินเผาที่เกิดจากปัจจัยอื่นด้วย เพื่อให้เข้าใจและนำผลการทดสอบไปใช้ในการวางแผนบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานที่สร้างขึ้นจากอิฐดินเผาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6.2.1 การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผา ที่ถูกทำลายด้วยกรดกำมะถันเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น แต่ชนิดของสารละลายในธรรมชาติที่ทำให้อิฐดินเผาบนโบราณสถานเกิดการเสื่อมสภาพยังมีอีกหลายชนิด เช่น กรดคาร์บอนิก กรดไนตริก เป็นต้น สารละลายเหล่านี้ทำให้มีรูปแบบการเสื่อมสภาพที่เหมือนกัน คือ การเกิดเกลือในวัสดุ แต่ชนิดของเกลือจะแตกต่างกันออกไปตามสารประกอบทางเคมีของสารละลายแต่ละชนิด และเกลือแต่ละชนิดก็มีขนาดและปริมาตรของการตกผลึกไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อระยะเวลาของการเสื่อมสภาพที่ต่างกันด้วย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผา ที่ถูกทำลายด้วยสารละลายชนิดอื่น เช่น กรดคาร์บอนิก และกรดไนตริก เป็นต้น

6.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสัมผัสสารละลายในสภาวะอื่นด้วย โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งเพียงอย่างเดียว ซึ่งในสภาวะจริงอิฐดินเผาบนโบราณสถานอาจเกิดการเสื่อมสภาพจากหลายสภาวะ เช่น ส่วนฐานของโบราณสถานที่ตั้งอยู่บนพื้นดินซึ่งมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ในกรณีนี้อิฐดินเผาอาจอยู่ในสภาวะสัมผัสกับสารละลายที่ไม่มีการไหลเวียน หรือในกรณีที่มีฝนตกติดต่อกันหลายวันหรือโบราณสถานตั้งอยู่บริเวณที่น้ำไหลผ่าน ในกรณีนี้อิฐดินเผาอาจอยู่ในสภาวะสัมผัสกับสารละลายที่มีการไหลเวียนตลอดเวลา เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลต่อระยะเวลาของการเสื่อมสภาพ หรือลักษณะรูปร่างผลึกของเกลือที่ต่างกันได้

6.2.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้ใช้กรดกำมะถันที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 เท่านั้น เพราะการเพิ่มหรือลดความเข้มข้น จะทำให้โอกาสของการชนกันระหว่างโมเลกุลเพิ่มหรือลดตามไปด้วย [4]

6.2.4 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์ปูนหมักในส่วนผสมอื่นๆ โดยในงานวิจัยนี้ใช้มอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนขาวหมักกับทรายหยาบ ในอัตราส่วนผสม 1:2 โดยปริมาตร [3] เท่านั้น ซึ่งการก่อสร้างโบราณสถานจริง จะสร้างโดยช่างจากท้องถิ่นนั้นๆ ดังนั้นส่วนผสมของมอร์ต้าร์ของช่างแต่ละท้องที่ก็จะแตกต่างกัน อาจส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์ปูนหมักที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ในการบูรณะโบราณสถานในปัจจุบัน จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับปูนหมักด้วย ซึ่งจะทำให้กลไกของการเสื่อมสภาพเปลี่ยนไป

6.2.5 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเกลือในช่องว่างรูพรุนของอิฐดินเผา โดยจากผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อนจะเห็นได้ว่าอิฐที่ใช้ทดสอบมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ซึ่งในความเป็นจริง อิฐไม่สามารถมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้ แต่เกลือสามารถมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาตกผลึกซ้ำแล้วซ้ำเล่า