

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 ผลการเชื่อมสภาพของอิฐ

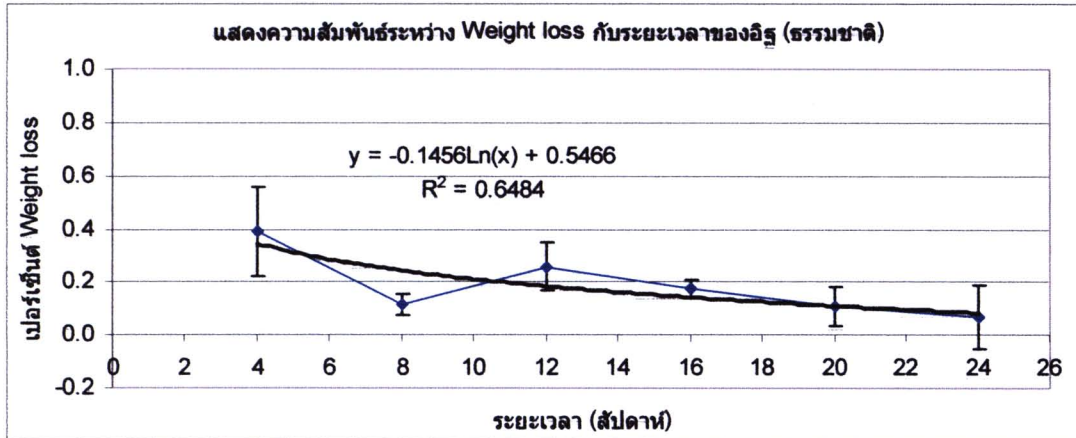
5.1.1 ผลการเชื่อมสภาพต่ออัตราการกักกร่อนของอิฐ

ก. วิเคราะห์ผลการทดสอบอัตราการกักกร่อนของอิฐ

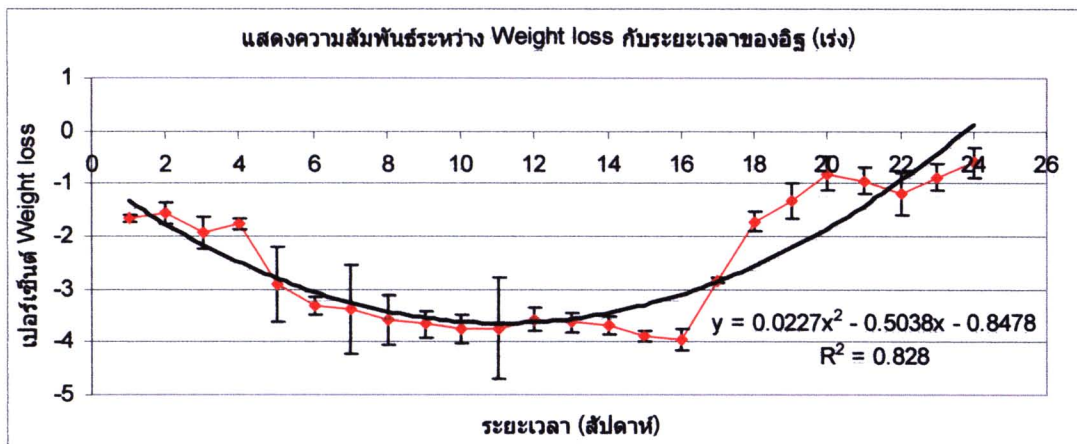
จากผลการทดสอบอัตราการกักกร่อนของอิฐขนาด 6 × 15 × 3.5 เซนติเมตร ภายใต้สภาพ ทั้ง 3 รูปแบบ คือ (1) การกักกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ (2) การกักกร่อนแบบเร่ง ปฏิริยา และ (3) การกักกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิริยา นำรูปแบบ ที่ (1) กับ (2) มาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม โดยพิจารณาจากค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) ของ 4 ตัวแบบ ได้แก่ Linear, Logarithmic, Quadratic และ Exponential ดังตาราง 5.1 โดยที่ตัวแบบใดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง ตัวแบบนั้นสามารถ ที่จะใช้พยากรณ์ได้ดี ซึ่งจากตาราง 5.1 พบว่าผลการทดสอบการกักกร่อนตามกระบวนการของ ธรรมชาติมีความสัมพันธ์แบบ Logarithmic ซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) อยู่ในช่วง ±0.034 ถึง ±0.166% และผลการทดสอบการกักกร่อนแบบเร่งปฏิริยามีความสัมพันธ์แบบ Quadratic (SD อยู่ ในช่วง ±0.051 ถึง ±0.961%) ดังรูป 5.1(ก) และ 5.1(ข) ตามลำดับ

ตาราง 5.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของตัวแบบในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ อัตราการกักกร่อนของอิฐ

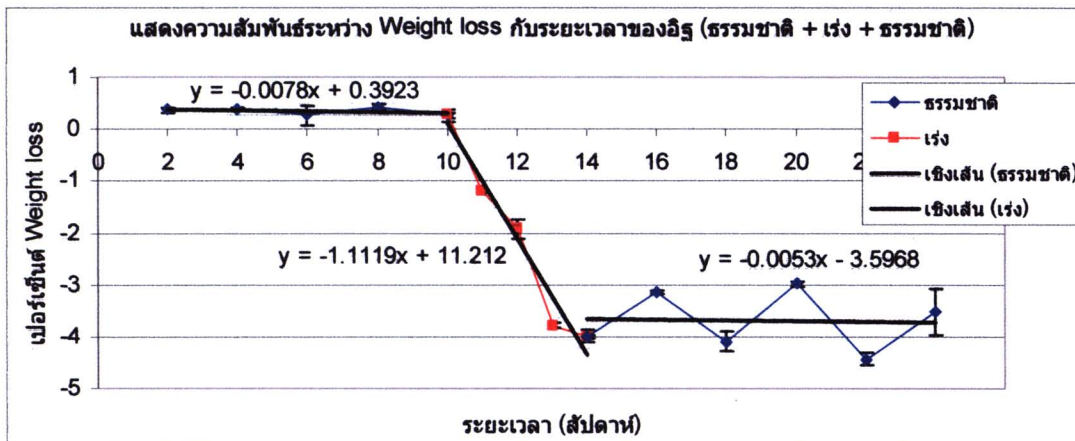
ตัวแปรตาม	ตัวแปรอิสระ	ตัวแบบ	R square	
			(1)ธรรมชาติ	(2)เร่งปฏิริยา
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ของอิฐ	เวลา	Linear	0.582	0.142
		Logarithmic	0.648	0.006
		Quadratic	0.601	0.828
		Exponential	0.611	-



(ก)



(ข)



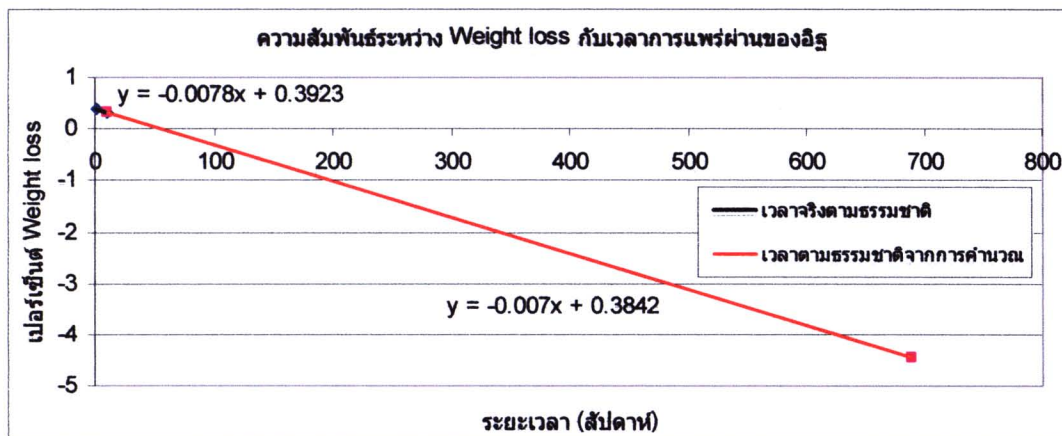
(ค)

รูป 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐ

จากผลการศึกษาอัตราการกัดกร่อนของอิฐที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติดัง
รูป 5.1(ก) พบว่าในช่วงเวลาการทดสอบ 24 สัปดาห์ อิฐมีน้ำหนักที่ลดลง สืบเนื่องจาก Weight loss

มีค่าเป็นบวก แต่มีแนวโน้มว่าจะมี Weight loss เป็นลบในระยะยาว (น้ำหนักเพิ่มขึ้น) ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา คือ ในระยะแรกมีแนวโน้มน้ำหนักของอิฐเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เป็นที่ไปตามทฤษฎีที่ว่า เมื่อกรดกำมะถันทำปฏิกิริยากับสารประกอบในเนื้ออิฐ จะเกิดเป็นสารประกอบซัลเฟตหรือเกลือซัลเฟตแทรกซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ และเมื่อนำอิฐไปอบ น้ำก็จะระเหยออกที่ผิวจนสุด แต่เกลือระเหยไม่ได้ เกลือจึงตกผลึกอยู่ภายในช่องว่างรูพรุนของเนื้อวัสดุ ทำให้อิฐมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อนำอิฐไปแช่กรด จะทำให้เกลือละลายน้ำกลายเป็นสารละลายอีกครั้งหนึ่ง การที่เกลือตกผลึกซ้ำแล้วซ้ำเล่าจากการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ผลึกของเกลือจะมีปริมาตรโตขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดแรงดันตรงผนังของรูพรุนและในที่สุดเนื้ออิฐจะแตกกะเทาะหลุดร่วงออก จึงทำให้อิฐเริ่มมีน้ำหนักลดลงและมีแนวโน้มที่จะมีน้ำหนักลดลงเรื่อยๆ สืบเกิดได้จากค่า Weight loss ที่เริ่มมีค่าติดลบน้อยลงและอาจจะมีค่าเป็นบวกในที่สุด ดังรูป 5.1(ข) ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่า การทดสอบแบบธรรมชาติที่มีความสัมพันธ์แบบ Logarithmic เป็นผลส่วนหนึ่งของการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์แบบ Quadratic โดยที่การทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาสามารถเร่งการเกิดเกลือและทำให้อิฐเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าการทดสอบแบบธรรมชาติด้วยกลไกแบบเดียวกัน

ส่วนการทดสอบการกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา จะมีเส้นแนวโน้มอยู่ 3 ช่วง ดังรูป 5.1(ค) ในส่วนของเส้นแนวโน้มช่วงที่ 1 และ 3 เป็นการทดสอบแบบธรรมชาติ พบว่า มีแนวโน้มว่าจะมีน้ำหนักของอิฐเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นแนวโน้มช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา เมื่อพิจารณารูปเร่งปฏิกิริยาช่วงที่ 2 ในรูป 5.1(ค) พบว่ามีค่า Weight Loss ลดลงได้สูงกว่าช่วงเวลา 4 สัปดาห์จากการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาในรูป 5.1(ข) ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า จากการทดสอบแบบธรรมชาติช่วงที่ 1 ในรูป 5.1(ค) อิฐจะมีเกลือหลายชนิดเกิดขึ้นจากธรรมชาติ ซึ่งเกลือแต่ละชนิดจะมีการขยายตัวของผลึกต่างกัน ดังนั้น เมื่อถึงกราฟช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นการเร่งปฏิกิริยา เกลือชนิดต่างๆ นั้น จะทำให้อิฐมีค่า Weight Loss ลดลงได้สูงกว่าการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาในรูป 5.1(ข) ซึ่งเกิดเกลือขึ้นเพียงชนิดเดียว และเมื่อนำเส้นแนวโน้มทั้งสามช่วงมาทำการเทียบการกระจายตัวของเวลาทดสอบ เพื่อให้เป็นระยะเวลาตามความเป็นจริง โดยมีค่าความชันของกราฟช่วงที่ 1 (Vd_1) = -0.0078, ความชันของกราฟช่วงที่ 3 (Vd_3) = -0.0053 และปริมาณการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาของกราฟช่วงที่ 2 (X_{t-r}) = 4.448 นำไปแทนในสมการที่ 2.16 จะได้ค่าเวลาการแพร่ผ่าน (Td_{t-r}) = 680 สัปดาห์ (ดูการคำนวณภาคผนวก ง.1) จากนั้นนำค่าเวลาแพร่ผ่านที่คำนวณได้ไปรวมกับเวลาจากการทดสอบของเส้นแนวโน้มช่วงที่ 1 = 10 สัปดาห์ จะได้ระยะเวลาตามจริงที่สามารถพยากรณ์อัตราการกัดกร่อนของอิฐทั้งหมด 690 สัปดาห์ หรือประมาณ 14.4 ปี ดังรูป 5.2



รูป 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับเวลาการแพร่ผ่านของอิฐ

ข. การประเมินและคาดคะเนอัตราการกัดกร่อนของอิฐ

จากสมการของเส้นแนวโน้มในรูป 5.1(ก) เป็นสมการสำหรับคาดคะเนอัตราการกัดกร่อนของอิฐที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติภายใต้ระยะเวลาการทดสอบ 24 สัปดาห์เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิฐมีน้ำหนักลดลง โดยจากสมการของเส้นแนวโน้มในสัปดาห์ที่ 24 สามารถประเมินได้ว่าจะเกิดการกัดกร่อนของอิฐเท่ากับ 0.084 เปอร์เซ็นต์

การเทียบเวลาเร่งการทดสอบกับเวลาตามจริง เพื่อใช้ในการพยากรณ์อัตราการกัดกร่อนของอิฐ จะทำการเทียบระหว่างกราฟเวลาการแพร่ผ่าน (รูป 5.2) ซึ่งเป็นเวลาตามจริง ที่มีเส้นแนวโน้มของ Weight loss ลดลง (มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น) กับกราฟการเร่งปฏิกิริยา (รูป 5.1(ข)) ในช่วงที่มีค่า Weight loss ลดลงได้สูงที่สุด จากกราฟการเร่งปฏิกิริยาดังรูป 5.1(ข) สามารถประเมินได้ว่าอิฐจะมีค่า Weight loss ลดลงได้สูงที่สุดเท่ากับ -3.643 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 11.10 สัปดาห์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการเวลาการแพร่ผ่านในรูป 5.2 จะได้ว่า ที่เปอร์เซ็นต์ Weight loss เท่ากับ -3.643 เปอร์เซ็นต์ จะเท่ากับระยะเวลาตามจริง 575.31 สัปดาห์

ดังนั้น ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 11.10 สัปดาห์ เท่ากับระยะเวลาตามจริง 575.31 สัปดาห์

ถ้า ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 1 สัปดาห์ จะเท่ากับระยะเวลาตามจริง 51.83 สัปดาห์
จะได้เวลาเร่งปฏิกิริยา (Acceleration Time, T_a) เทียบกับเวลาตามจริง (Natural Time, T_n) ดังนี้

$$T_n = 51.83 T_a \quad (5.1)$$

จากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.1(ข) พิจารณาระยะเวลาที่สามารถคาดคะเนการกัดกร่อนได้นานที่สุดคือ 24 สัปดาห์ ซึ่งสามารถคาดคะเนได้ว่าจะเกิดการกัดกร่อนของอิฐเท่ากับ 0.1362 เปอร์เซ็นต์ นั่นหมายความว่า ในระยะเวลาตามจริง 1244 สัปดาห์ หรือประมาณ 25.9 ปี โบราณสถานที่สร้างจากอิฐดินเผาจะเกิดการกัดกร่อนของอิฐเท่ากับ 0.1362 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ผลการคาดคะเนอัตราการกัดกร่อนของอิฐในงานวิจัยนี้ เกิดขึ้นจากการสัมผัสกับกรดกำมะถันเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

นอกจากนี้ พัชรวิไล [8] ยังได้ทำการศึกษาการกัดกร่อนเพื่อใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของวัสดุ 4 ประเภท ของโบราณสถานที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ดังตาราง 5.2 ซึ่งผลการคาดคะเนที่ได้ มีความสอดคล้องกัน คือ ออกไซด์ของซัลเฟอร์ในธรรมชาติทั้งที่อยู่รูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือกรดกำมะถัน ก็สามารถทำให้เกิดเกลือและสร้างความเสียหายให้กับโบราณสถานที่สร้างจากอิฐดินเผาได้เช่นกัน แต่ผลการคาดคะเนในตารางที่ 5.2 ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ได้โดยตรง เนื่องจากสมมติฐานของการทดสอบต่างกัน

ตาราง 5.2 เปอร์เซ็นต์การกัดกร่อนของวัสดุที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ [8]

อัตราการกัดกร่อน (เปอร์เซ็นต์) **					
วัสดุ	ระยะเวลาในการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์				
	1 ปี	5 ปี	10 ปี	50 ปี	100 ปี
อิฐเก่า	0.1578	0.7779	1.5530	7.7538	15.5049
อิฐปัจจุบัน	0.0263	0.1187	0.2341	1.1574	2.3116
ปูนปั้นเก่า	2.9041	14.5632	29.1371	T.D.	T.D.
ปูนปั้นปัจจุบัน	1.1433	5.7423	11.4911	57.4811	T.D.

หมายเหตุ : T.D. หมายถึง วัสดุเกิดการกัดกร่อนหมด อันเนื่องมาจากการเกิดเกลือและการแตก

** ภายใต้สมมติฐานจากการให้วัสดุรูปลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตรเมตร สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้น 50–800 ส่วนในล้านส่วน ในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 ผลการเสื่อมสภาพต่อกำลังอัดของอิฐ

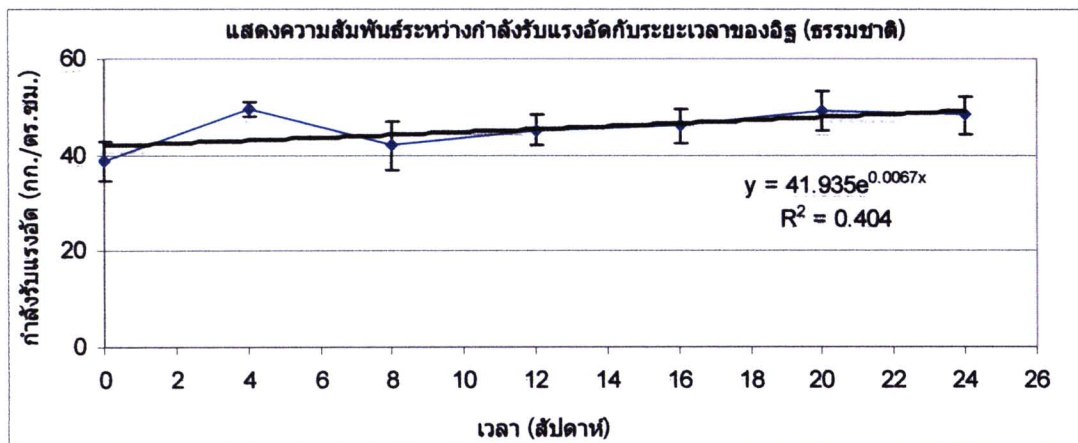
ก. วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัดของอิฐ

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐภายใต้สมมติฐานขนาด $3 \times 3 \times 6$ เซนติเมตร ทั้ง 3 รูปแบบ คือ (1) การเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติ (2) การเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยา และ (3) การเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับการเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยา นำรูปแบบที่ (1) กับ (2) มาหาความสัมพันธ์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) ดังตาราง 5.3 พบว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติมีความสัมพันธ์แบบ Exponential (SD อยู่ในช่วง ± 1.405 ถึง ± 4.961 ksc.) และผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐที่เสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยามีความสัมพันธ์แบบ Quadratic (SD อยู่ในช่วง ± 0.165 ถึง ± 11.590 ksc.) ดังรูป 5.3(ก) และ 5.3(ข) ตามลำดับ

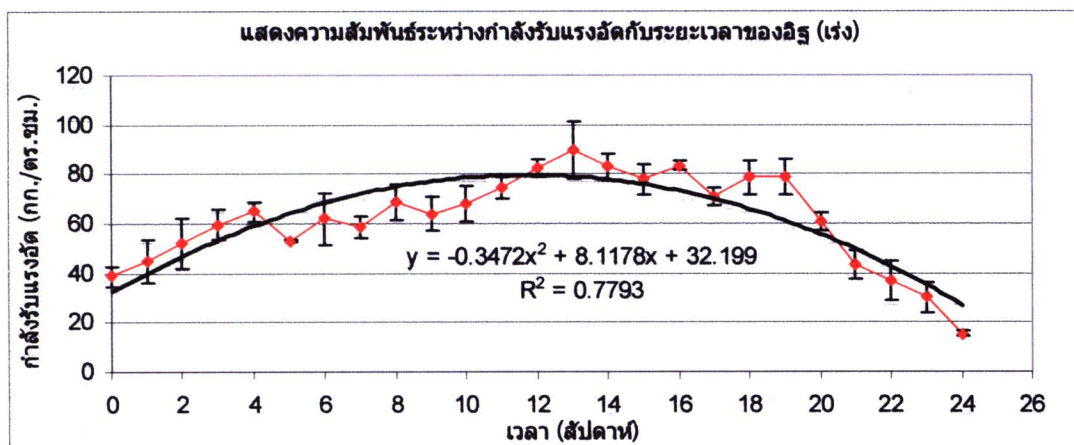


ตาราง 5.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของตัวแบบในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ
กำลังรับแรงอัดของอิฐ

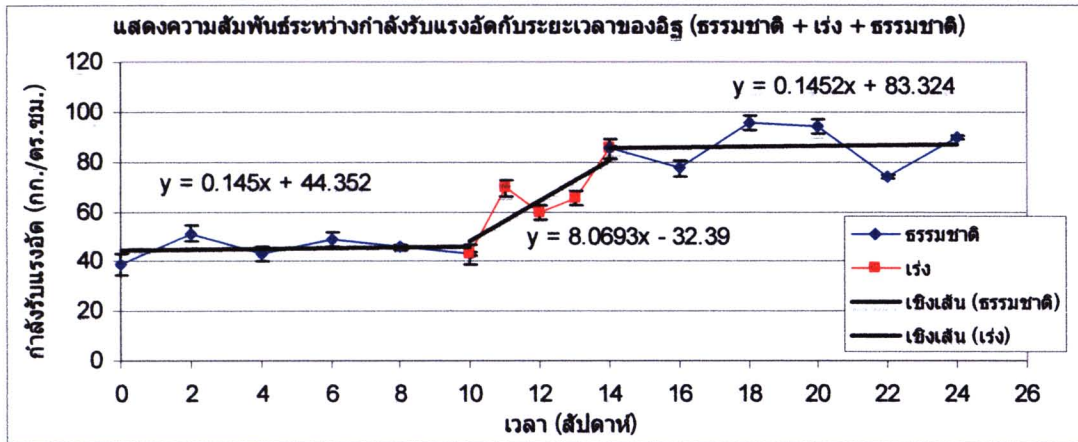
ตัวแปรตาม	ตัวแปรอิสระ	ตัวแบบ	R square	
			(1)ธรรมชาติ	(2)แรงปฏิกิริยา
กำลังรับแรงอัดของอิฐ	เวลา	Linear	0.390	0.007
		Logarithmic	-	-
		Quadratic	0.401	0.779
		Exponential	0.404	0.046



(ก)



(ข)

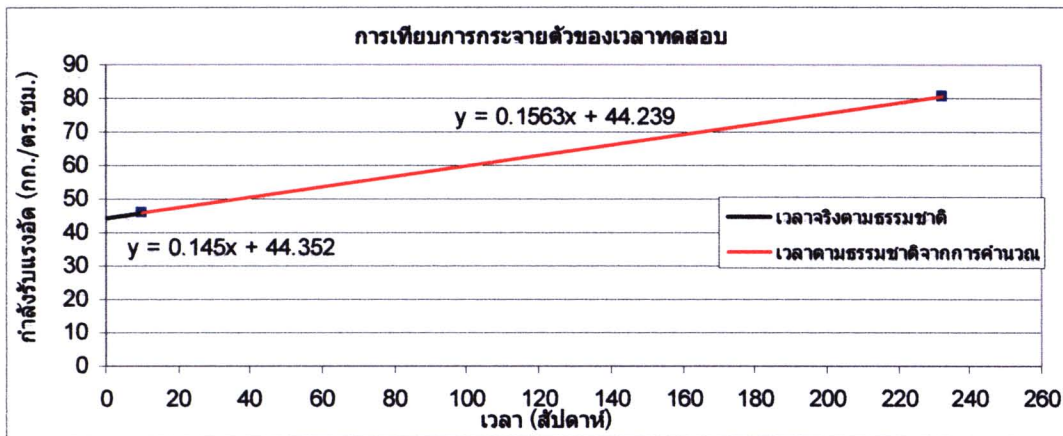


(ก)

รูป 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับกำลังอัดของอิฐ

จากผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของอิฐที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติดังรูป 5.3 (ก) พบว่า ในช่วงเวลาการทดสอบ 24 สัปดาห์ อิฐมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มว่าจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา คือ ในระยะแรกมีแนวโน้มกำลังอัดของอิฐเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สาเหตุที่ทำให้อิฐมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอาจอธิบายได้ว่า การเกิดเกลือในเนื้ออิฐช่วยส่งถ่ายแรงในช่องว่างรูพรุน ทำให้อิฐมีพื้นที่รับแรงมาก จึงส่งผลให้กำลังอัดของอิฐเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อผลึกเกลือโตขึ้นจนเต็มรูพรุนและมีแรงดันทำให้เนื้ออิฐแตกกะเทาะ ทำให้อิฐมีพื้นที่รับแรงน้อยลง จึงส่งผลให้กำลังอัดของอิฐลดลงเช่นกัน สังเกตได้จากค่ากำลังอัดที่มีค่าน้อยลงจนเข้าใกล้ศูนย์ดังรูป 5.3(ข) ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่า การทดสอบแบบธรรมชาติที่มีความสัมพันธ์แบบ Exponential เป็นผลส่วนหนึ่งของการเร่งปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์แบบ Quadratic โดยที่การทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาสามารถเร่งการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าการทดสอบแบบธรรมชาติด้วยกลไกแบบเดียวกัน

ส่วนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยาดังรูป 5.3(ค) มีความสอดคล้องกับการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของอิฐ คือ ถ้าอิฐมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้กำลังอัดของอิฐเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อทำการเทียบการกระจายตัวของเวลาทดสอบ โดยมีค่าความชันของกราฟช่วงที่ 1 (Vd_1) = 0.1450, ความชันของกราฟช่วงที่ 3 (Vd_3) = 0.1452 และปริมาณการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาของกราฟช่วงที่ 2 ($X_{t-t'}$) = 32.277 นำไปแทนในสมการที่ 2.16 จะได้ค่าเวลาการแพร่ผ่าน (Diffusion Conversion Time, $Td_{t-t'}$) = 222 สัปดาห์ (ดูการคำนวณภาคผนวก ง.2) นำค่าเวลาการแพร่ผ่านที่คำนวณได้ไปรวมกับเวลาจากเส้นแนวโน้มช่วงที่ 1 = 10 สัปดาห์ จะได้ระยะเวลาคำนวณจริงที่สามารถคาดคะเนกำลังรับแรงอัดของอิฐทั้งหมด 232 สัปดาห์ (ประมาณ 4.8 ปี) ดังรูป 5.4



รูป 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาการแพร่ผ่านของอิฐ

ข. การประเมินและคาดคะเนกำลังรับแรงอัดของอิฐ

จากสมการของเส้นแนวโน้มในรูป 5.3(ก) เป็นสมการสำหรับคาดคะเนกำลังรับแรงอัดของอิฐที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติภายใต้ระยะเวลาการทดสอบ 24 สัปดาห์ เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิฐมีแนวโน้มของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น โดยจากสมการเส้นแนวโน้มในสัปดาห์ที่ 24 สามารถประเมินได้ว่ากำลังอัดของอิฐจะมีค่าเท่ากับ 49.25 กก./ตร.ซม.

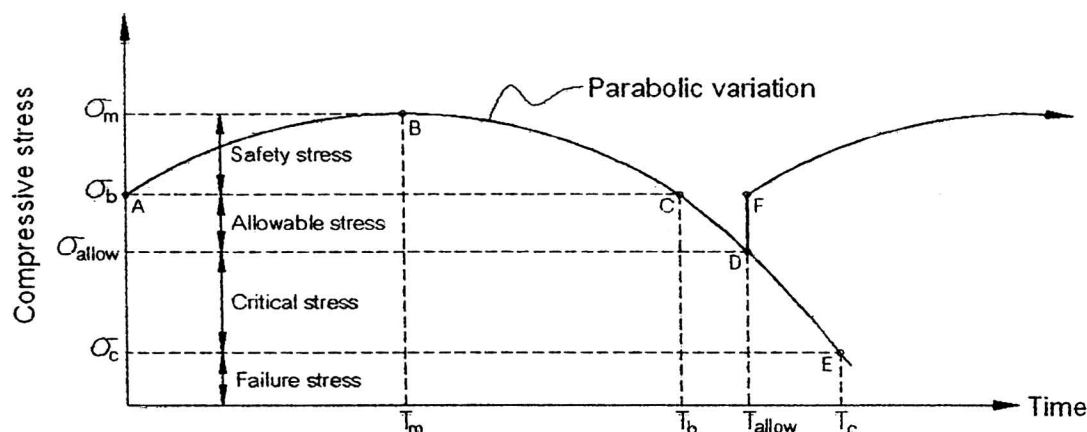
การเทียบเวลาเร่งการทดสอบกับเวลาตามจริง เพื่อใช้ในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของอิฐ จะทำการเทียบระหว่างกราฟเวลาการแพร่ผ่าน (รูป 5.4) ซึ่งเป็นเวลาตามจริง ที่มีลักษณะเส้นแนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้น กับกราฟการเร่งปฏิกิริยา (รูป 5.3(ข)) ในช่วงที่มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นได้สูงที่สุด จากกราฟการเร่งปฏิกิริยาดังรูป 5.3(ข) สามารถประเมินได้ว่าอิฐจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นได้สูงสุดเท่ากับ 79.65 กก./ตร.ซม. ในระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 11.69 สัปดาห์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการเวลาการแพร่ผ่านในรูปที่ 5.4 พบว่าที่กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 79.65 กก./ตร.ซม. จะเท่ากับระยะเวลาตามจริง 225.83 สัปดาห์

ดังนั้น ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 11.69 สัปดาห์ เท่ากับระยะเวลาตามจริง 225.83 สัปดาห์
ถ้า ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 1 สัปดาห์ จะเท่ากับระยะเวลาตามจริง 19.32 สัปดาห์
จะได้เวลาเร่งปฏิกิริยา (Acceleration Time, T_a) เทียบกับเวลาตามจริง (Natural Time, T_n) ดังนี้

$$T_n = 19.32 T_a \quad (5.2)$$

และจากเส้นแนวโน้มในรูป 5.3(ข) หากพิจารณาระยะเวลาเร่งที่สามารถคาดคะเนกำลังอัดได้นานที่สุด คือ 24 สัปดาห์ ซึ่งสามารถคาดคะเนได้ว่าจะมีกำลังอัดของอิฐเท่ากับ 27.04 กก./ตร.ซม. นั้นหมายความว่า ในระยะเวลาตามจริง 463.7 สัปดาห์ หรือประมาณ 9.6 ปี โบราณสถานที่ยังสร้างจากอิฐดินเผาจะมีกำลังรับแรงอัดของอิฐเหลืออยู่เท่ากับ 27.04 กก./ตร.ซม. ทั้งนี้ผลการคาดคะเนอัตราการกัดกร่อนของอิฐในงานวิจัยนี้ เกิดขึ้นจากการสัมผัสกับกรดกำมะถันเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

ในการประยุกต์ใช้ผลการวิจัยเพื่อคาดคะเนระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำนุบำรุง ซึ่งอาจจะส่งผลต่อกำล้างของโครงสร้างโบราณสถาน โดยสามารถจำลองเป็นแนวคิดสำหรับประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำนุบำรุงโบราณสถานที่สร้างด้วยอิฐดินเผาได้ดังรูป 5.5

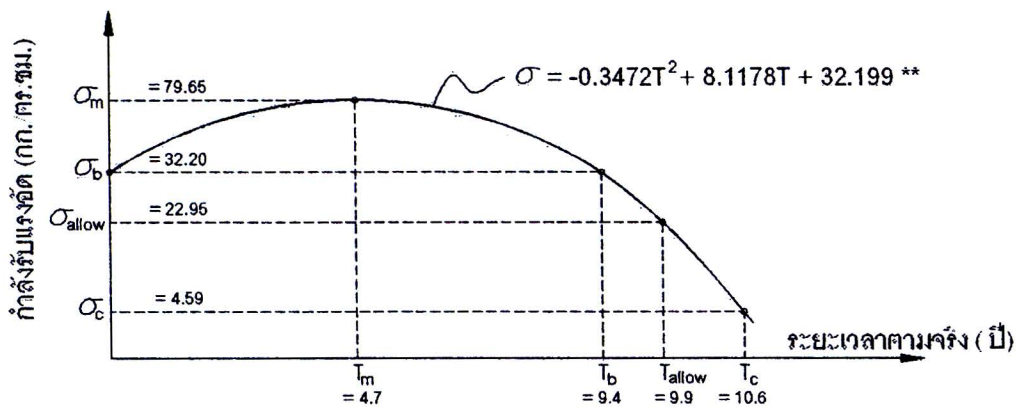


รูปที่ 5.5 แนวคิดสำหรับประเมินการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผากับเวลาที่เหมาะสมในการทำนุบำรุง

- โดยที่ σ_c คือ หน่วยแรงอัดสูงสุด (Critical Stress) ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์
- σ_{allow} คือ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้เกิดขึ้น (Allowable Stress) = $\sigma_c \times SF$
- σ_b คือ กำลังรับแรงอัดเริ่มต้นของอิฐ (Compressive Strength of brick)
- σ_m คือ กำลังรับแรงอัดของอิฐที่สามารถเพิ่มได้สูงสุด (Maximum Strength of brick)
- T_m คือ เวลาที่อิฐมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด
- T_b คือ เวลาที่กำลังรับแรงอัดของอิฐมีค่าเท่ากับกำลังรับแรงอัดเริ่มต้น
- T_{allow} คือ เวลาที่เหมาะสมในการทำนุบำรุง
- T_c คือ เวลาที่เริ่มเกิดการวิบัติของอิฐ

จากรูป 5.5 เป็นกระบวนการเสื่อมสภาพของอิฐดินเผา โดยกำหนดให้จุด A เป็นจุดเริ่มต้นของการเริ่มก่อสร้างโบราณสถาน ซึ่งจะมีกำลังรับแรงอัดเริ่มต้นของอิฐเท่ากับ σ_b เมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่งจนถึงจุด B อิฐจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นได้สูงสุดเท่ากับ σ_m เนื่องจากการเกิดเกลือในช่องว่างรูพรุนของอิฐทำให้อิฐมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น (Safety) หลังจากนั้นเกลือจะเริ่มเต็มรูพรุน ทำให้อิฐเริ่มแตกกะเทาะจนทำให้มีกำลังรับแรงอัดลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุด C ซึ่งอิฐจะมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ σ_b อีกครั้งหนึ่ง (Allowable) เมื่อกำลังรับแรงอัดลดลงจนถึงจุด D ควรทำการบูรณะซ่อมแซมใหม่ (Critical) หากปล่อยให้กำลังอัดลดลงจนถึงจุด E อาจเกิดการวิบัติของโครงสร้างบางส่วนได้ (Failure) หลังจากที่ทำกาการบูรณะซ่อมแซมใหม่ที่จุด D จะทำให้อิฐมีกำลังรับแรงอัดเริ่มต้นใหม่อีกครั้งที่จุด F จากนั้นจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการเสื่อมสภาพต่อไป

ตัวอย่างการคำนวณเวลาที่เหมาะสมในการทำนุบำรุงโบราณสถาน กรณีของเจดีย์วัดหัว
ช่วง อ.เมือง จ.เชียงใหม่ ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
พบว่าแรงสั่นในเจดีย์ ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_c) บริเวณส่วนที่เป็นคอคอดตอนกลางของ
เจดีย์เท่ากับ 4.59 กก./ตร.ซม. ตามมาตรฐานสำหรับอาคารวัสดุก่อของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
กำหนดให้ใช้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 5 ดังนั้นหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (σ_{allow}) มีค่า
เท่ากับ 22.95 กก./ตร.ซม. จากสมการของเส้นแนวโน้มในรูป 5.3(ข) และแนวคิดสำหรับประเมิน
การเสื่อมสภาพของอิฐดินเผาในรูป 5.5 สามารถหาค่ากำลังอัดของอิฐและที่ระยะเวลาต่างๆ ได้ดังนี้



หมายเหตุ: ** ภายใต้การทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาในสภาวะเปียกสลับแห้ง สัมผัสกับกรดกำมะถันความเข้มข้น
ร้อยละ 3 ในระยะเวลา 24 สัปดาห์

รูป 5.6 การประเมินการเสื่อมสภาพและเวลาที่เหมาะสมในการทำนุบำรุงของเจดีย์วัดหัวช่วง

จากรูป 5.6 สามารถคำนวณได้ว่า (ดูการคำนวณภาคผนวก ง.7) ที่เวลา 4.7 ปี อิฐจะมีกำลัง
อัดเพิ่มขึ้นได้สูงสุดเท่ากับ 79.65 กก./ตร.ซม. เมื่อเวลาผ่านไป 9.4 ปี อิฐจะมีกำลังอัดลดลงเหลือ
32.20 กก./ตร.ซม. เวลาที่เหมาะสมในการทำนุบำรุงเจดีย์วัดหัวช่วงเท่ากับ 9.9 ปี (สมการพยากรณ์
กำลังรับแรงอัดของอิฐสามารถพยากรณ์ได้ 9.6 ปี แต่เพื่อให้ความเข้าใจในการประยุกต์ใช้สมการ
จึงใช้สมการนี้พยากรณ์ต่อให้ครบทุกตัวแปร) และถ้าไม่ทำการซ่อมบำรุงจะเกิดการวิบัติของอิฐที่
เวลา 10.6 ปี โดยในการบูรณะจริง ไม่จำเป็นต้องบูรณะใหม่หมดทั้งองค์ แต่สามารถบูรณะเฉพาะ
จุดที่เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดเท่านั้น และจากงานวิจัยของ Kuchitsu [28] พบว่า การฉาบปูนปิดผิว
อิฐจะทำให้มีความชื้นภายใน ซึ่งความชื้นจะทำให้เกลืออยู่ในรูปของสารละลายตลอด ดังนั้น
หลังจากบูรณะโครงสร้างที่เป็นอิฐเสร็จแล้ว ควรฉาบปิดผิวอิฐด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อให้
เกลือตกผลึกที่ผิวปูนฉาบด้านนอก เพียงแต่ต้องหมั่นตรวจสอบสภาพของปูนฉาบบ่อยครั้ง หรืออีก
วิธีหนึ่งอาจปิดด้วยแผ่นทอง ซึ่งสามารถยืดเวลาการตรวจสอบได้นานขึ้น โดยทั้งนี้ ผลประเมิน
การเสื่อมสภาพของอิฐที่คำนวณได้นั้น เกิดขึ้นจากการสัมผัสกรดกำมะถันเพียงปีจัญเดียวเท่านั้น

5.2 ผลการเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์

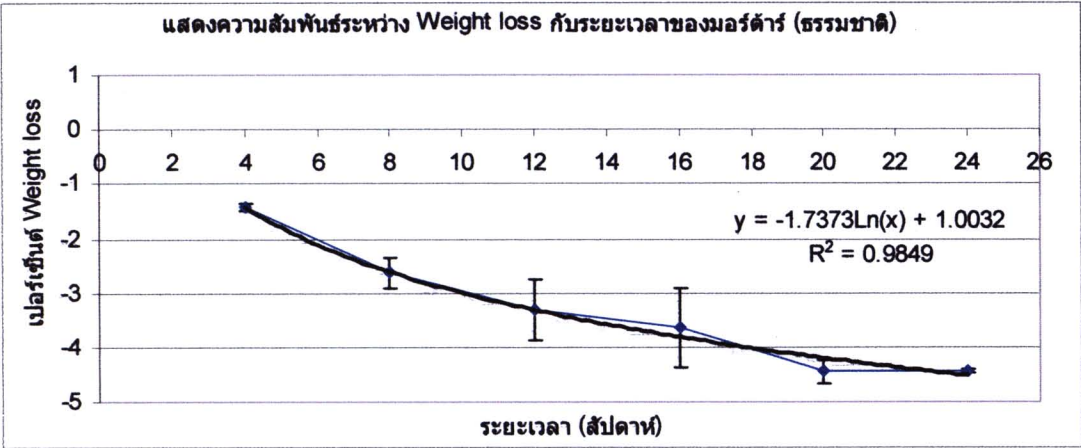
5.2.1 ผลการเสื่อมสภาพต่ออัตราการกัดกร่อนของมอร์ตาร์

ก. วิเคราะห์ผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของมอร์ตาร์

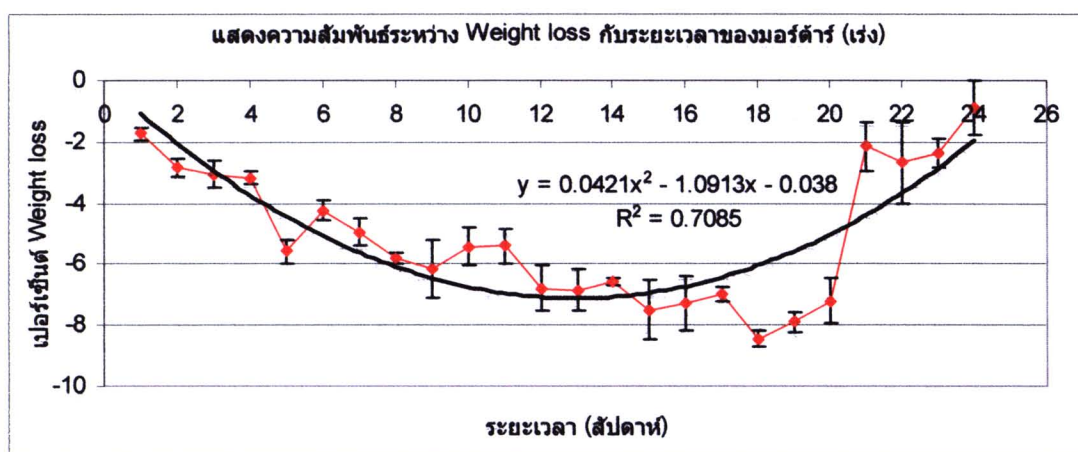
จากผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ขนาด 5 × 5 × 5 เซนติเมตร ภายใต้สภาพทั้ง 3 รูปแบบ คือ (1) การกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ (2) การกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา และ (3) การกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา นำรูปแบบที่ (1) กับ (2) มาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) ดังตาราง 5.4 พบว่าผลการทดสอบการกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติของมอร์ตาร์มีความสัมพันธ์แบบ Logarithmic (SD อยู่ในช่วง ±0.039 ถึง ±0.731%) และผลการทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยามีความสัมพันธ์แบบ Quadratic (SD อยู่ในช่วง ±0.104 ถึง ±1.332%) ดังรูป 5.7(ก) และ 5.7(ข) ตามลำดับ

ตาราง 5.4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของตัวแบบในการวิเคราะห์ผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของมอร์ตาร์

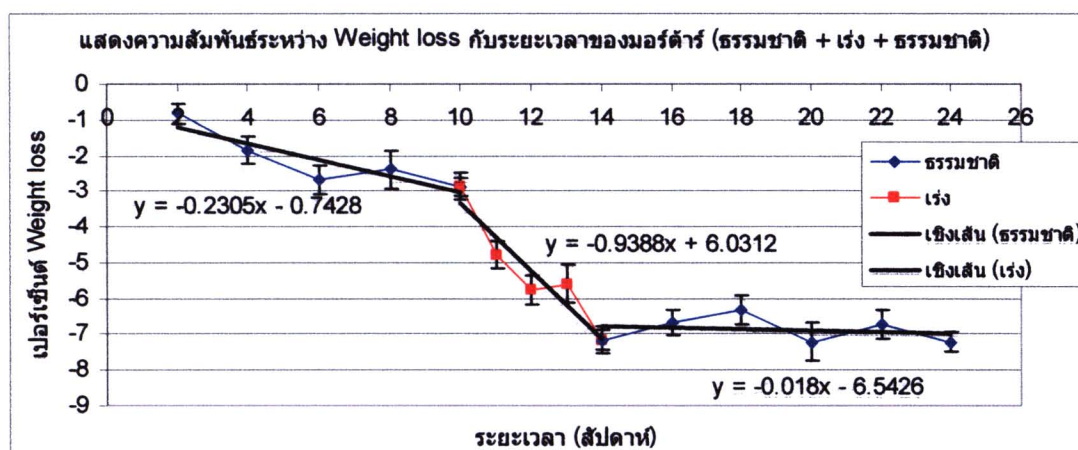
ตัวแปรตาม	ตัวแปรอิสระ	ตัวแบบ	R square	
			(1)ธรรมชาติ	(2)เร่งปฏิกิริยา
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของมอร์ตาร์	เวลา	Linear	0.928	0.015
		Logarithmic	0.985	0.125
		Quadratic	0.981	0.708
		Exponential	-	-



(ก)



(ข)

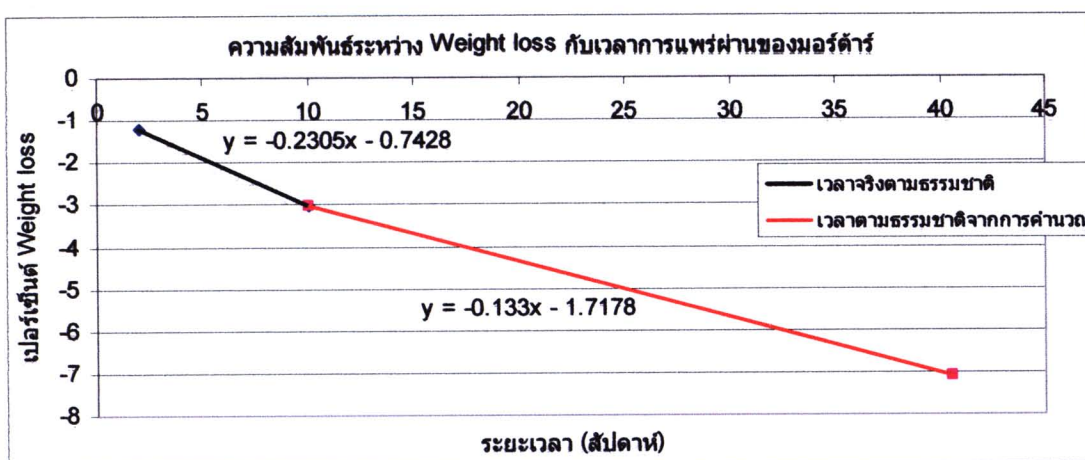


(ค)

รูป 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของมอร์ดาร์

จากผลการศึกษาอัตราการกักกร่อนของมอร์ดาร์ที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติดังรูป 5.7(ค) พบว่า ในช่วงเวลาการทดสอบ 24 สัปดาห์ มีแนวโน้มของ Weight loss ลดลง (น้ำหนักเพิ่มขึ้น) สังเกตได้จากค่า Weight loss ที่มีค่าเป็นลบ แต่ลดลงในอัตราที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสาเหตุที่ทำให้มอร์ดาร์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากการตกผลึกของเกลือในช่องว่างรูพรุน แต่ในระยะยาวจะมีค่า Weight loss ที่เริ่มคิดลบน้อยลงและอาจจะมีค่าเป็นบวกในที่สุดดังรูป 5.7(ข) ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าการทดสอบอัตราการกักกร่อนของมอร์ดาร์แบบธรรมชาติที่มีความสัมพันธ์แบบ Logarithmic เป็นผลส่วนหนึ่งในช่วงต้นของการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์แบบ Quadratic ซึ่งมีกลไกของการเสื่อมสภาพแบบเดียวกัน

ส่วนการทดสอบการกักกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยาของมอร์ตาร์ดังรูป 5.7(ค) พบว่ามีลักษณะของเส้นแนวโน้มน้ำคล้ายกับผลการกักกร่อนของอิฐ คือ เส้นแนวโน้มน้ำช่วงที่ 1 และ 3 มีแนวโน้มน้ำของน้ำหนักรมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นแนวโน้มน้ำช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา และเมื่อนำเส้นแนวโน้มน้ำทั้งสามช่วงมาทำการเทียบการกระจายตัวของเวลาทดสอบ โดยมีค่าความชันของกราฟช่วงที่ 1 (Vd_1) = -0.2305, ความชันของกราฟช่วงที่ 3 (Vd_3) = -0.0180 และปริมาณการกักกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาของกราฟช่วงที่ 2 (X_{t-r}) = 3.755 นำไปแทนในสมการที่ 2.16 จะได้ค่าเวลาการแพร่ผ่าน (Diffusion Conversion Time, Td_{t-r}) = 30.6 สัปดาห์ (ดูการคำนวณภาคผนวก ง.3) จากนั้นนำค่าเวลาการแพร่ผ่านที่คำนวณได้ไปรวมกับเวลาจากการทดสอบของเส้นแนวโน้มน้ำช่วงที่ 1 = 10 สัปดาห์ จะได้ระยะเวลาตามจริงที่สามารถพยากรณ์อัตราการกักกร่อนของมอร์ตาร์ทั้งหมด 40.6 สัปดาห์ หรือประมาณ 0.8 ปี ดังรูป 5.8



รูป 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับเวลาการแพร่ผ่านของมอร์ตาร์

ข. การประเมินและคาดคะเนอัตราการกักกร่อนของมอร์ตาร์

จากสมการของเส้นแนวโน้มน้ำในรูป 5.7(ก) เป็นสมการสำหรับคาดคะเนอัตราการกักกร่อนของมอร์ตาร์ที่เสื่อมสภาพแบบธรรมชาติภายใต้ระยะเวลาการทดสอบ 24 สัปดาห์ เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์มี Weight loss ลดลง (น้ำหนักเพิ่มขึ้น) โดยจากสมการของเส้นแนวโน้มน้ำในสัปดาห์ที่ 24 สามารถประเมินได้ว่าจะเกิดอัตราการกักกร่อนของมอร์ตาร์เท่ากับ -4.518 เปอร์เซ็นต์

การเทียบเวลาเร่งการทดสอบกับเวลาตามจริง เพื่อใช้ในการพยากรณ์อัตราการกักกร่อนของมอร์ตาร์ จะทำการเทียบระหว่างกราฟเวลาการแพร่ผ่าน (รูป 5.8) ซึ่งเป็นเวลาตามจริง ที่มีเส้นแนวโน้มน้ำของ Weight loss ลดลง (มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น) กับกราฟการเร่งปฏิกิริยา (รูป 5.7(ข))

ในช่วงที่มีค่า Weight loss ลดลงได้สูงที่สุด จากกราฟการเร่งปฏิกิริยาดังรูป 5.7(ข) สามารถประเมินได้ว่ามอร์ตาร์จะมีเปอร์เซ็นต์ Weight loss ลดลงได้สูงสุดเท่ากับ -7.106 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 12.96 สัปดาห์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเวลาการแพร่ผ่านในรูปที่ 5.8 จะได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์ Weight loss เท่ากับ -7.106 เปอร์เซ็นต์ จะเท่ากับระยะเวลาคงจริง 40.51 สัปดาห์ ดังนั้น ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 12.96 สัปดาห์ เท่ากับระยะเวลาคงจริง 40.51 สัปดาห์ ถ้า ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 1 สัปดาห์ จะเท่ากับระยะเวลาคงจริง 3.12 สัปดาห์ จะได้เวลาเร่งปฏิกิริยา (Acceleration Time, T_a) เทียบกับเวลาตามจริง (Natural Time, T_n) ดังนี้

$$T_n = 3.12 T_a \quad (5.3)$$

จากเส้นแนวโน้มในรูป 5.7(ข) พิจารณาระยะเวลาที่สามารถคาดคะเนการกัดกร่อนได้นานที่สุด คือ 24 สัปดาห์ ซึ่งสามารถคาดคะเนได้ว่ามอร์ตาร์จะมีค่า Weight loss เท่ากับ -1.98 เปอร์เซ็นต์ (ยังมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า Weight loss ติดลบ) นั่นหมายความว่า ในระยะเวลาคงจริง 74.88 สัปดาห์ หรือประมาณ 1.6 ปี มอร์ตาร์บนโบราณสถานจะเกิดการกัดกร่อนเท่ากับ -1.98 เปอร์เซ็นต์ และจากเส้นแนวโน้มในรูป 5.7(ข) สามารถคาดคะเนได้ว่าจะเริ่มมีค่า Weight loss เป็นบวกที่ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 25.96 สัปดาห์ หรือเท่ากับระยะเวลาคงจริง 81 สัปดาห์ (ประมาณ 1.7 ปี)

จากสมการ 5.1 และ 5.3 จะเห็นว่าการเทียบเวลาคงจริงของอิฐและมอร์ตาร์มีค่าต่างกันมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า มอร์ตาร์ปูนหมักเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าอิฐตั้งแต่เริ่มแรกอยู่แล้ว ดังนั้น เมื่อผ่านการใช้งานหรือผ่านช่วงเวลาของการเสื่อมสภาพ จึงทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจากการเกิดเกลือแล้วแตกกะเทาะและจะพังก่อนอิฐ ด้วยเหตุนี้ การเทียบเวลาคงจริงของมอร์ตาร์จึงมีค่าน้อยกว่าอิฐ และจะมีอายุการใช้งานน้อยกว่าอิฐ ทั้งนี้ผลการคาดคะเนอัตราการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้ เกิดขึ้นจากการสัมพันธ์กับกรดกำมะถันความเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

5.2.2 ผลการเสื่อมสภาพต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

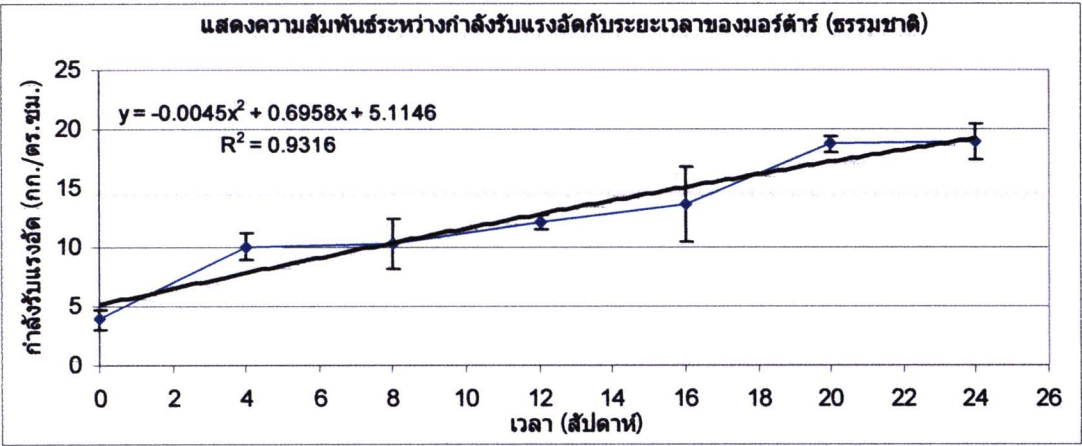
ก. วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ภายใต้อุณหภูมิที่ 3 รูปแบบ คือ (1) การเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติ (2) การเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยา และ (3) การเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา นำรูปแบบที่ (1) กับ (2) มาหาความสัมพันธ์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) ดังตาราง 5.5 พบว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติมีความสัมพันธ์เป็นแบบ Quadratic (SD อยู่ในช่วง ± 0.670 ถึง ± 3.205 ksc.) และผลการ

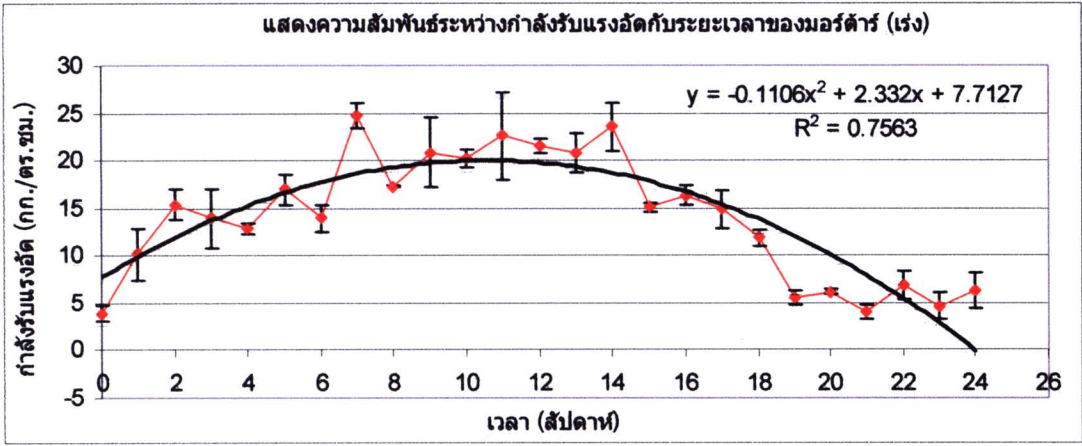
ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่เสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยามีความสัมพันธ์แบบ Quadratic (SD อยู่ในช่วง ±0.105 ถึง ±4.615ksc.) ดังรูป 5.9(ก) และ 5.9(ข) ตามลำดับ

ตาราง 5.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของตัวแบบในการวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

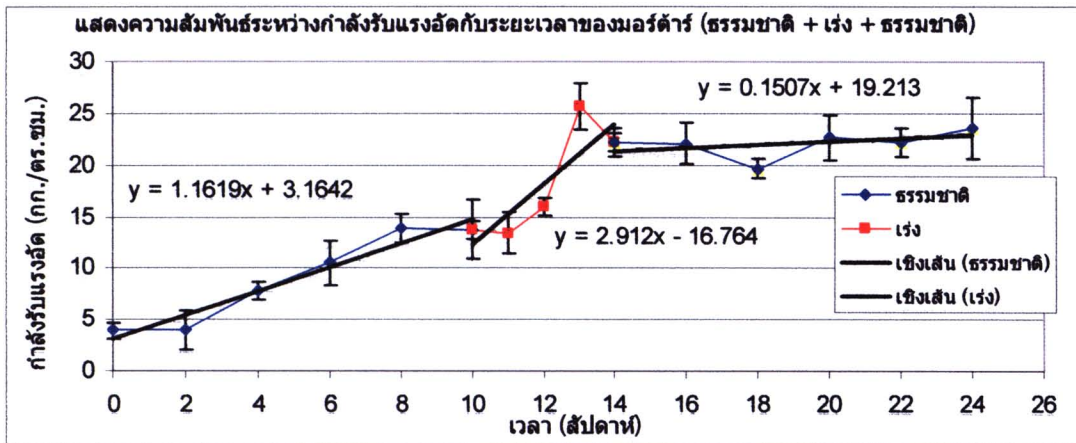
ตัวแปรตาม	ตัวแปรอิสระ	ตัวแบบ	R square	
			(1)ธรรมชาติ	(2)เร่งปฏิกิริยา
กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์	เวลา	Linear	0.929	0.129
		Logarithmic	-	-
		Quadratic	0.932	0.756
		Exponential	0.817	0.151



(ก)



(ข)



(ค)

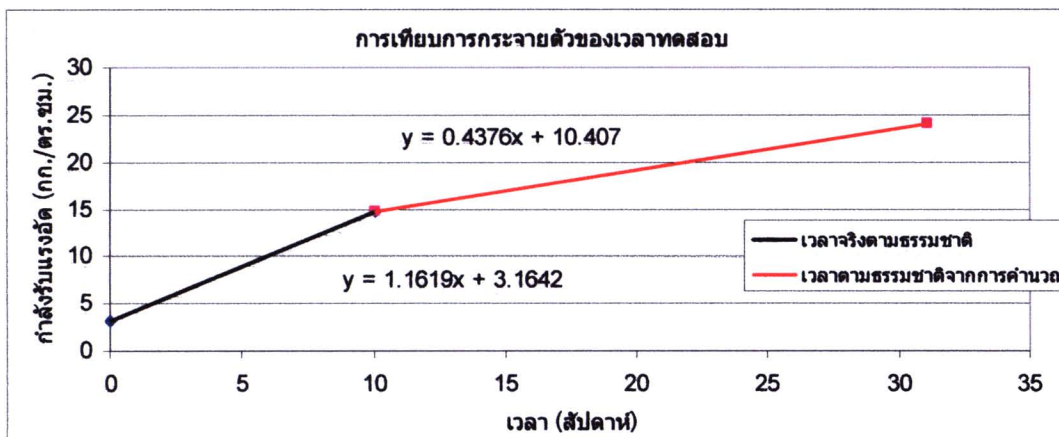
รูป 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับกำลังอัดของมอร์ตาร์

จากผลการศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติดังรูป 5.9(ค) พบว่า ในช่วงเวลาการทดสอบ 24 สัปดาห์ มอร์ตาร์มีแนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา คือ มอร์ตาร์มีแนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยการเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดเกลือในช่องว่างรูพรุนของมอร์ตาร์เช่นเดียวกับอิฐ ทำให้มอร์ตาร์มีพื้นที่รับแรงอัดเพิ่มขึ้นและมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และหลังจากที่เกลือมีแรงดันทำให้เนื้อมอร์ตาร์แตกกะเทาะ ก็จะทำให้มอร์ตาร์เริ่มมีกำลังอัดลดลงดังรูป 5.9(ข) เมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้มของการเสื่อมสภาพตามแบบธรรมชาติของมอร์ตาร์ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบ Quadratic มีแนวโน้มคล้ายกับการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้น นั้นหมายความว่า การเสื่อมสภาพตามแบบธรรมชาติของมอร์ตาร์เป็นผลเพียงส่วนหนึ่งของการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์แบบ Quadratic

ส่วนการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา ดังรูป 5.9(ค) มีความสอดคล้องกับการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ คือ ถ้ามอร์ตาร์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อนำเส้นแนวโน้มทั้งสามช่วงมาทำการเทียบการกระจายตัวของเวลาทดสอบ โดยมีค่าความชันของกราฟช่วงที่ 1 (Vd_1) = 1.1619, ความชันของกราฟช่วงที่ 3 (Vd_3) = 0.1507 และ ปริมาณการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาของกราฟช่วงที่ 2 ($X_{t,r}$) = 11.648 นำไปแทนในสมการที่ 2.16 จะได้ค่าเวลาการแพร่ผ่าน (Diffusion Conversion Time, $Td_{t,r}$) = 21.1 สัปดาห์ (ดูการคำนวณภาคผนวก ง.4) จากนั้นนำค่าเวลาการแพร่ผ่านที่คำนวณได้ไปรวมกับเวลาจากการทดสอบของเส้นแนวโน้ม



ช่วงที่ 1 = 10 สัปดาห์ จะได้ระยะเวลาตามจริงที่สามารถพยากรณ์การเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์ทั้งหมด 31.1 สัปดาห์ หรือประมาณ 0.7 ปี ดังรูป 5.10



รูป 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาการแพร่ผ่านของมอร์ตาร์

ข. ประเมินและคาดคะเนกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

จากสมการของเส้นแนวโน้มในรูป 5.9(ก) เป็นสมการสำหรับคาดคะเนกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติภายใต้ระยะเวลาการทดสอบ 24 สัปดาห์เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์มีแนวโน้มของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น โดยจากสมการเส้นแนวโน้มในสัปดาห์ที่ 24 สามารถประเมินได้ว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จะมีค่าเท่ากับ 19.22 กก./ตร.ซม.

การเทียบเวลาเร่งการทดสอบกับเวลาตามจริง เพื่อใช้ในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ จะทำการเทียบระหว่างกราฟเวลาการแพร่ผ่าน (รูป 5.10) ซึ่งเป็นเวลาตามจริง ที่มีลักษณะเส้นแนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้น กับกราฟการเร่งปฏิกิริยา (รูป 5.9(ข)) ในช่วงที่มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นได้สูงที่สุด จากกราฟการเร่งปฏิกิริยาดังรูป 5.9(ข) สามารถประเมินได้ว่ามอร์ตาร์จะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นได้สูงสุดเท่ากับ 20.01 กก./ตร.ซม. ในระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 10.54 สัปดาห์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการเวลาการแพร่ผ่านในรูป 5.10 พบว่าที่กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 20.01 กก./ตร.ซม. จะเท่ากับระยะเวลาตามจริง 21.94 สัปดาห์

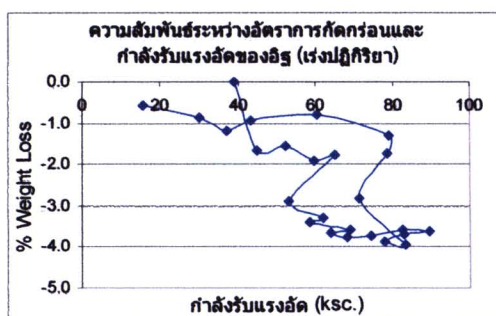
ดังนั้น ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 10.54 สัปดาห์ เท่ากับระยะเวลาตามจริง 21.94 สัปดาห์

ถ้า ระยะเวลาเร่งปฏิกิริยา 1 สัปดาห์ จะเท่ากับระยะเวลาตามจริง 2.08 สัปดาห์
จะได้เวลาเร่งปฏิกิริยา (Acceleration Time, T_a) เทียบกับเวลาตามจริง (Natural Time, T_n) ดังนี้

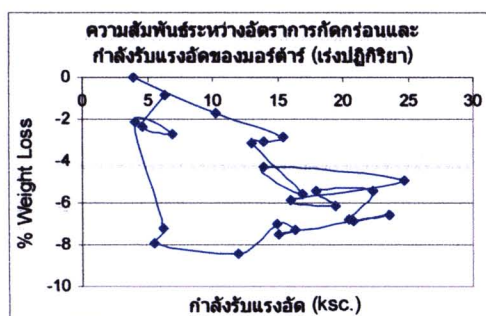
$$T_n = 2.08 T_a \quad (5.4)$$

และสามารถใช้สมการในการคาดคะเน 50 สัปดาห์ หรือ 1.04 ปี ทั้งนี้ผลการคาดคะเนอัตราการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้ เกิดขึ้นจากการสัมผัสกับกรดกำมะถันความเข้มข้นเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

เมื่อนำผลการทดสอบของอิฐและมอร์ตาร์มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนและกำลังอัด พบว่า เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ของอิฐ (รูป 5.11(ก)) และมอร์ตาร์ (รูป 5.11(ข)) มีลักษณะที่คล้ายกัน คือ ในช่วงแรกวัสดุจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น และมีค่า %Weight Loss จะลดลง (น้ำหนักเพิ่มขึ้น) นั่นเป็นเพราะการเกิดเกลือในเนื้อวัสดุ จะทำให้วัสดุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นและมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อวัสดุเริ่มแตกกะเทาะ (สังเกตได้จากค่า %Weight Loss ที่ติดลบน้อยลง) จึงทำให้วัสดุมีกำลังอัดลดลงในช่วงปลาย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเกิดเกลือในช่องว่างรูพรุนของวัสดุ จะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการกัดกร่อนและกำลังอัดของวัสดุดังรูป 5.11



(ก)



(ข)

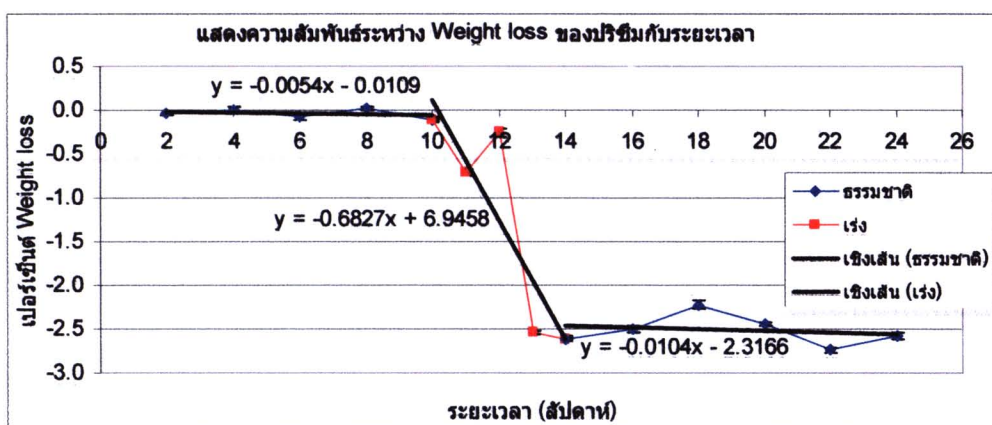
รูป 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับกำลังรับแรงอัดของอิฐและมอร์ตาร์

5.3 ผลการเสื่อมสภาพของปรีซึมอิฐก่อ

5.3.1 ผลการเสื่อมสภาพต่ออัตราการกัดกร่อนของปรีซึมอิฐก่อ

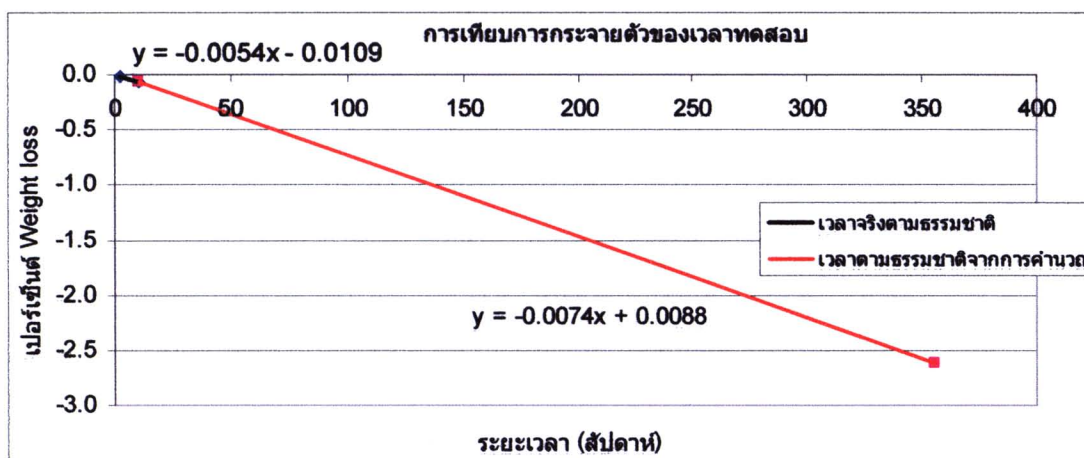
ก. วิเคราะห์ผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อนของปรีซึมอิฐก่อ

จากผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อนแบบธรรมชาติสลับแรงปฏิกิริยาของปรีซึม นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของการทดสอบทั้ง 3 ช่วงดังรูป 5.12



รูป 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปรีซึมอิฐก่อ

จากผลการศึกษาอัตราการกัดกร่อนของปริซึมคังรูป 5.12 จะมีเส้นแนวโน้มอยู่ 3 ช่วง (SD เฉลี่ย $\pm 0.272\%$) เส้นแนวโน้มช่วงที่ 1 และ 3 เป็นการทดสอบแบบธรรมชาติ พบว่า มีแนวโน้มของ Weight loss ลดลง (น้ำหนักเพิ่มขึ้น) แต่ลดลงในอัตราที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับเส้นแนวโน้มช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการกัดกร่อนของอิฐและมอร์ตาร์ จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน คือ ทั้งอิฐและมอร์ตาร์มีแนวโน้มของ Weight loss ลดลงเช่นกัน เมื่อนำเส้นแนวโน้มทั้งสามช่วงมาทำการเทียบการกระจายตัวของเวลาทดสอบ โดยมีค่าความชันของกราฟช่วงที่ 1 (Vd_1) = -0.0054, ความชันของกราฟช่วงที่ 3 (Vd_3) = -0.0104 และปริมาณการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาของกราฟช่วงที่ 2 (X_{t-r}) = 2.738 นำไปแทนในสมการที่ 2.16 จะได้ค่าเวลาการแพร่ผ่าน (Diffusion Conversion Time, Td_{t-r}) = 345.8 สัปดาห์ (ดูการคำนวณภาคผนวก ง.5) จากนั้นนำค่าเวลาการแพร่ผ่านที่คำนวณได้ไปรวมกับเวลาจากการทดสอบของเส้นแนวโน้มช่วงที่ 1 = 10 สัปดาห์ จะได้ระยะเวลาตามจริงที่สามารถพยากรณ์อัตราการกัดกร่อนของปริซึมอิฐก่อทั้งหมด 355.8 สัปดาห์ หรือประมาณ 7.4 ปี ดังรูป 5.13



รูป 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับเวลาการแพร่ผ่านของปริซึมอิฐก่อ

ข. การประเมินและคาดคะเนอัตราการกัดกร่อนของปริซึมอิฐก่อ

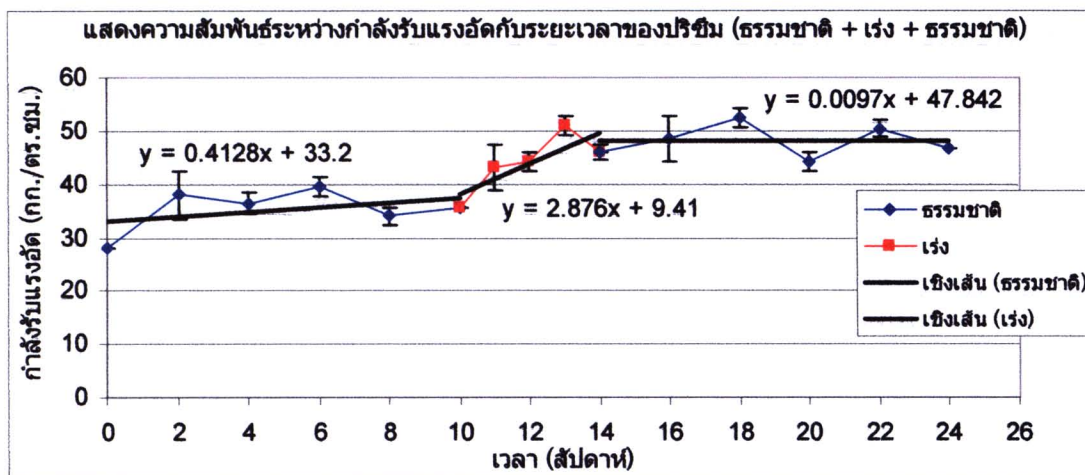
จากสมการของเส้นแนวโน้มในรูป 5.13 เป็นสมการเวลาการแพร่ผ่านของอัตราการกัดกร่อนของปริซึมอิฐก่อ โดยจากการวิเคราะห์ผลการกัดกร่อนข้างต้น ให้พิจารณาระยะเวลานานที่สุดที่สามารถคาดคะเนการกัดกร่อนได้คือ ที่ระยะเวลา 355.8 สัปดาห์ หรือประมาณ 7.4 ปี ปริซึมอิฐก่อจะมีค่า Weight loss เท่ากับ -2.624 เปอร์เซ็นต์ (ยังมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า Weight loss ติดลบ) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการกัดกร่อนของอิฐและมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาเดียวกัน คือ ที่ระยะเวลาจริง 355.8 สัปดาห์ (ประมาณ 7.4 ปี) จะมีค่าการกัดกร่อนของอิฐเท่ากับ -3.237 เปอร์เซ็นต์

(จากสมการเส้นแนวโน้มรูป 5.3(ข)) และของมอร์ตาร์เกิดการกัดกร่อนทั้งหมด (423 เปอร์เซ็นต์, จากสมการเส้นแนวโน้มรูป 5.7(ข)) ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่า ค่าอัตราการกัดกร่อนของปรีซิมอิฐก่ออยู่ระหว่างกลางของค่าอัตราการกัดกร่อนของอิฐกับมอร์ตาร์

5.3.2 ผลการเสื่อมสภาพต่อกำลังอัดของปรีซิมอิฐก่อ

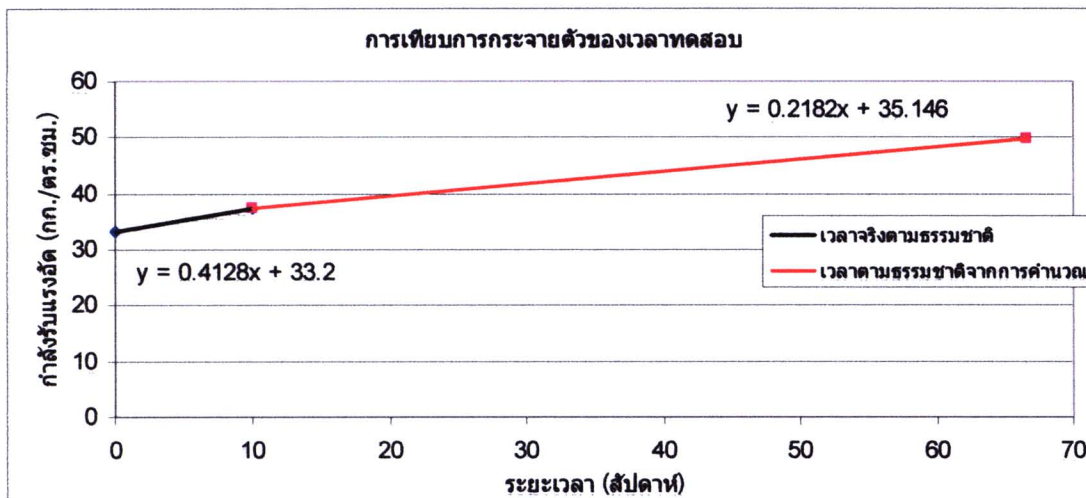
ก. วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัดของปรีซิมอิฐก่อ

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปรีซิมอิฐก่อที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับกำลังอัดของการทดสอบทั้งสามช่วงดังรูป 5.14



รูป 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับกำลังอัดของปรีซิมอิฐก่อ

จากผลการศึกษากำลังอัดของปรีซิมดังรูป 5.14 พบว่า เส้นแนวโน้มกำลังอัดของปรีซิมทั้ง 3 ช่วงมีค่าเพิ่มขึ้น (SD เฉลี่ย ± 2.116 ksc.) โดยเส้นแนวโน้มช่วงที่ 2 มีความชันมากที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการเร่งปฏิกิริยา ทำให้เร่งการเกิดเกลือในรูปปูนได้เร็วขึ้น เมื่อนำเส้นแนวโน้มทั้งสามช่วงมาทำการเทียบการกระจายตัวของเวลาทดสอบ โดยมีค่าความชันของกราฟช่วงที่ 1 (Vd_1) = 0.4128, ความชันของกราฟช่วงที่ 3 (Vd_3) = 0.0097 และปริมาณการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาของกราฟช่วงที่ 2 (X_{t-r}) = 11.504 นำไปแทนในสมการที่ 2.16 จะได้ค่าเวลาการแพร่ผ่าน (Diffusion Conversion Time, Td_{t-r}) = 56.6 สัปดาห์ (ดูการคำนวณภาคผนวก ง.6) จากนั้นนำค่าเวลาการแพร่ผ่านที่คำนวณได้ไปรวมกับเวลาจากการทดสอบของเส้นแนวโน้มช่วงที่ 1 = 10 สัปดาห์ จะได้ระยะเวลาตามจริงที่สามารถพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของปรีซิมอิฐก่อทั้งหมด 66.6 สัปดาห์ หรือประมาณ 1.4 ปี ดังรูป 5.15



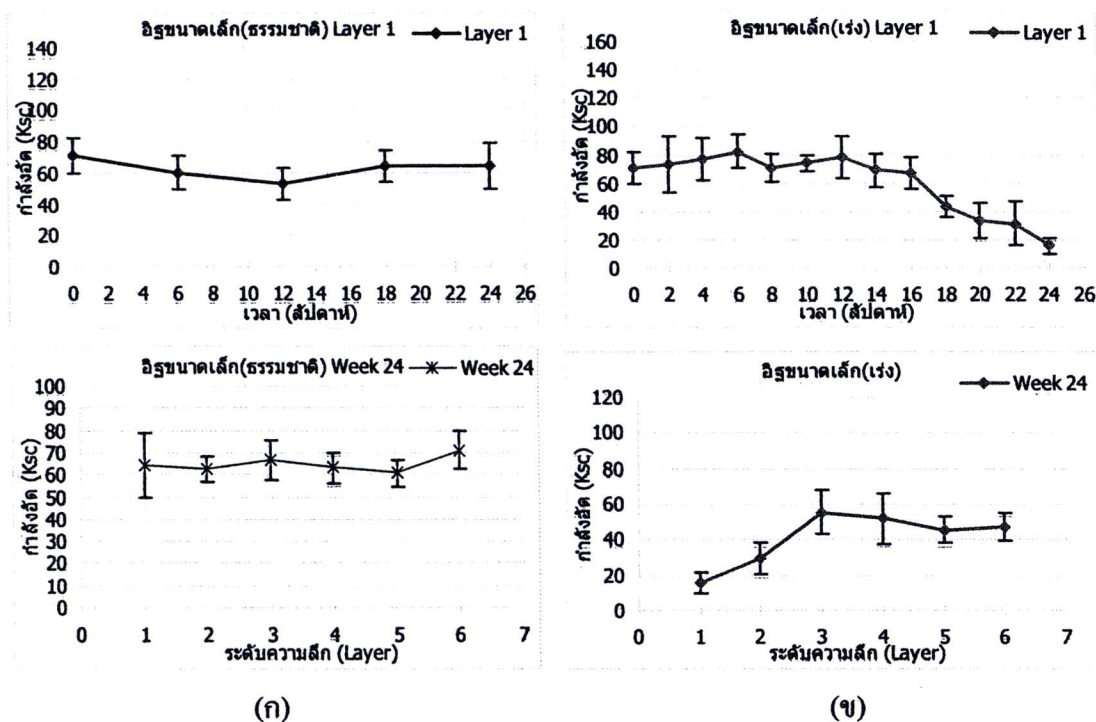
รูป 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาการแพร่ผ่านของปริซึมอิฐก่อ

ข. ประเมินและคาดคะเนกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อ

จากสมการของเส้นแนวโน้มในรูป 5.15 เป็นสมการเวลาการแพร่ผ่านสำหรับคาดคะเนกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อ โดยจากการวิเคราะห์ผลกำลังอัดข้างต้น ให้พิจารณาระยะเวลาที่นานที่สุดที่สามารถคาดคะเนกำลังรับแรงอัดได้คือ ที่ระยะเวลา 66.6 สัปดาห์ หรือประมาณ 1.4 ปี ปริซึมอิฐก่อจะมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 49.678 กก./ตร.ซม. เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐและมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาเดียวกัน คือ ที่ระยะเวลาจริง 66.6 สัปดาห์ จะมีค่าการกักครองของอิฐเท่ากับ 56.057 กก./ตร.ซม. (จากสมการเส้นแนวโน้มรูป 5.3(ข)) และของมอร์ตาร์ไม่สามารถรับแรงอัดได้ (-31.009 กก./ตร.ซม., จากสมการเส้นแนวโน้มรูป 5.9(ข)) ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่า กำลังอัดของปริซึมอิฐก่อจะมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ แต่จะมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของอิฐ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอิฐมีกำลังรับแรงอัดสูง เมื่อประสานด้วยมอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำ จึงทำให้ปริซึมอิฐก่อมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่างกลางของอิฐกับมอร์ตาร์ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของปริซึมอิฐก่อ (รูป 2.8)

5.4 ผลการเสื่อมสภาพของอิฐขนาดเล็ก

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐขนาดเล็กขนาด $5 \times 5 \times 5$ มิลลิเมตร โดยหากทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของอิฐระดับความลึกที่ 1 ซึ่งเป็นระดับความลึกที่สามารถเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าความลึกระดับอื่น สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังรูป 5.16



รูป 5.16 กำลังรับแรงอัดของอิฐขนาดเล็กที่ระยะเวลาและระดับความลึกจากผิวสัมผัส

(ก) อิฐขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติ

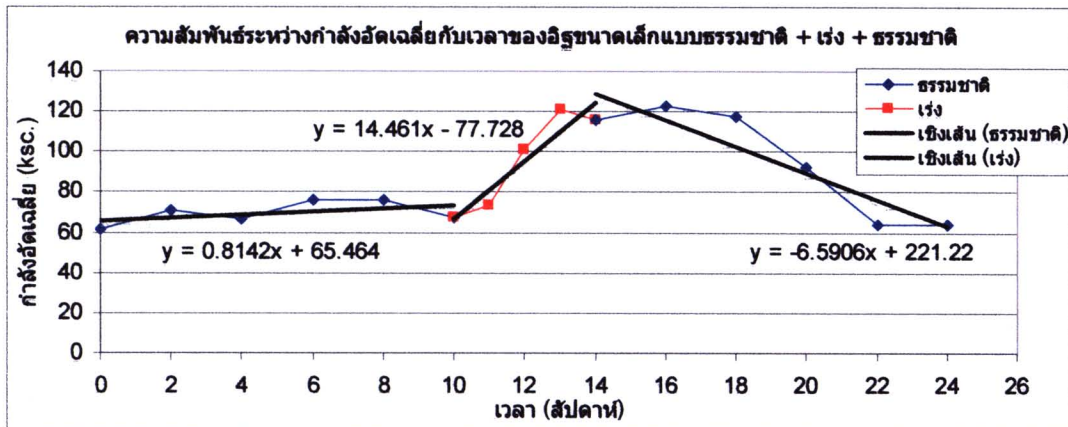
(ข) อิฐขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามแบบเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของอิฐขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติ ในระดับความลึกที่ 1 ที่ระยะเวลาทดสอบ 24 สัปดาห์ ดังรูป 5.16(ก-บน) พบว่า หลังการทดสอบ การเสื่อมสภาพแบบธรรมชาติในเวลา 24 สัปดาห์ กำลังอัดของอิฐในระดับความลึกที่ 1 ยังไม่มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงอย่างชัดเจน (มีค่าคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 62 กก./ตร.ซม.) และเมื่อเปรียบเทียบกับความลึกระดับอื่นในสัปดาห์ที่ 24 ดังรูป 5.16(ก-ล่าง) จะเห็นได้ว่ามีกำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่า การทดสอบการเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติของอิฐที่ระยะเวลา 24 สัปดาห์ ยังไม่เกิดการกักกร่อนที่ผิวสัมผัส

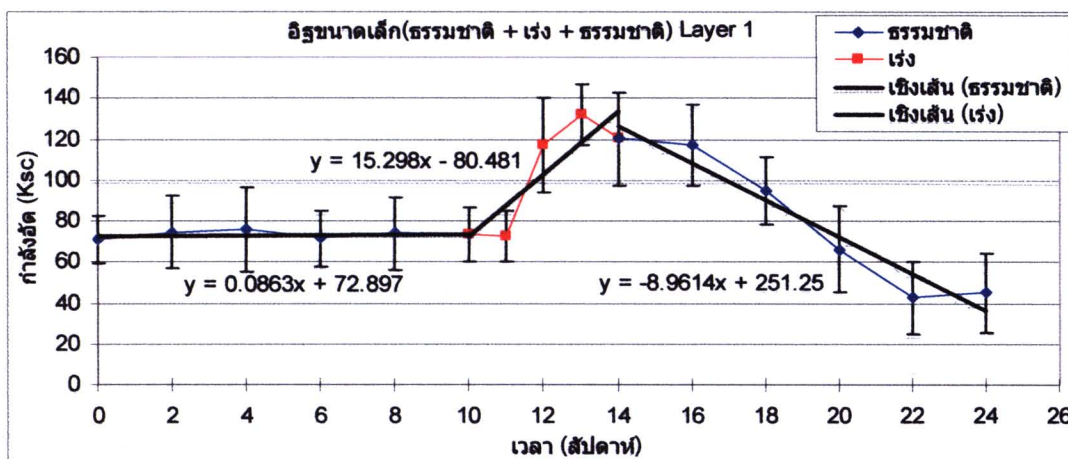
และผลกำลังรับแรงอัดของอิฐขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยาในระดับความลึกที่ 1 ดังรูป 5.16(ข-บน) พบว่า ในช่วง 6 สัปดาห์แรก มีแนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่หลังจากสัปดาห์ที่ 6 มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับรูป 5.16(ข-ล่าง) คือในเวลาทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา 24 สัปดาห์ กำลังอัดของอิฐระดับความลึกที่ 1 จะเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าความลึกระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเสื่อมสภาพของอิฐขึ้นอยู่กับระดับความลึกจากผิวหน้าและระยะเวลาการใช้งาน โดยที่กำลังอัดที่ผิวนอกสุดจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อระยะเวลาผ่านไป

ส่วนผลกำลังรับแรงอัดของอิฐขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา นำมาพรีดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยทั้ง 6 ความลึกของอิฐกับเวลาการทดสอบได้ดังรูป 5.17 และพิจารณาที่ความลึกระดับที่ 1 ซึ่งเป็นระดับความลึกที่สามารถเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าความลึกระดับอื่น สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังรูป 5.18



รูป 5.17 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา



รูป 5.18 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดของอิฐขนาดเล็กระดับความลึกที่ 1 ที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา

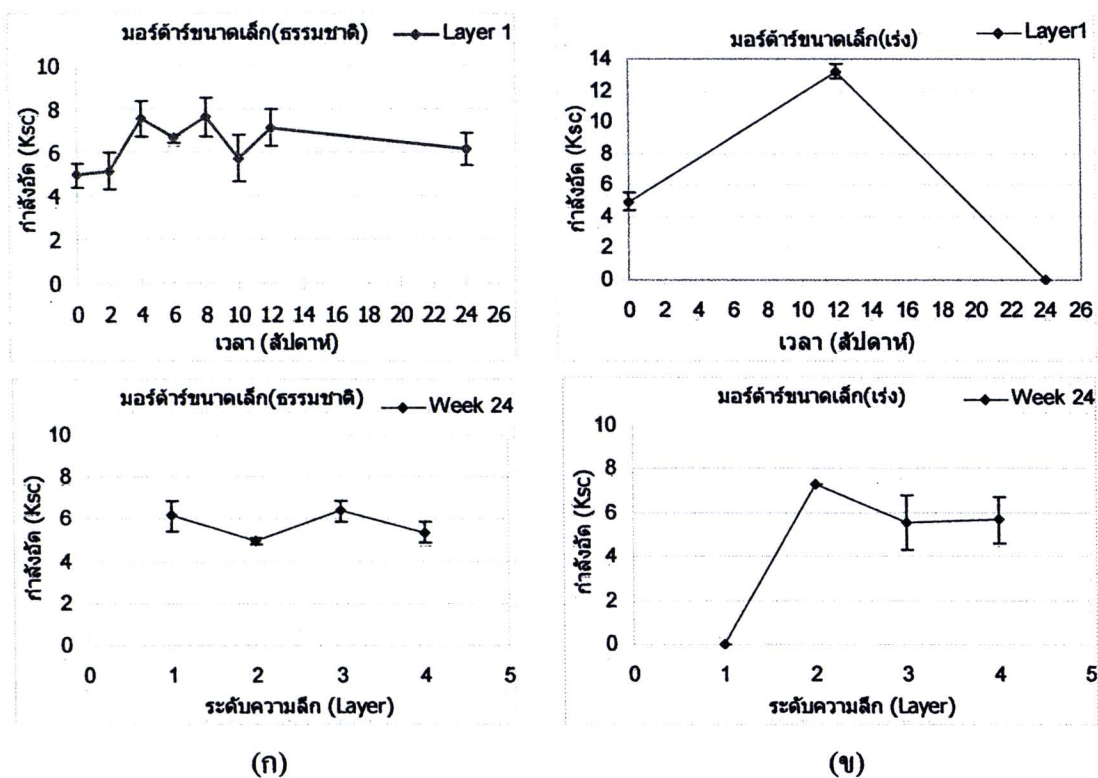
จากผลกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยาดังรูป 5.17 พบว่ารูปแบบของเส้นแนวโน้มทั้งสามช่วง มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์แบบ Quadratic คือ เส้นแนวโน้มช่วงที่ 1 มีค่า

กำลังอัดเพิ่มขึ้นและจะเพิ่มขึ้นได้สูงสุดในเส้นแนวโน้มช่วงที่ 2 หลังจากนั้นจะเริ่มมีกำลังอัดลดลงในช่วงที่ 3 โดยกำลังอัดระดับความลึกที่ 1 ซึ่งเป็นผิวสัมผัสจะมีค่าต่ำที่สุดดังรูป 5.18

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดสอบกำลังอัดของอิฐที่ไม่เคลือบอีพ็อกซี ($3 \times 3 \times 6$ ซม.) เหมาะสำหรับการทดสอบระยะสั้น เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของตัววัสดุอย่างเฉียบ โดยถ้าทำการทดสอบระยะยาว จะเกิดพื้นที่ทับซ้อน (Overlap) ของการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าที่ผิดเพี้ยน หากต้องการทราบค่ากำลังอัดที่เป็นผลจากการเสื่อมสภาพที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงที่สุด จะต้องเคลือบด้วยอีพ็อกซีเพื่อให้เกิดการเสื่อมสภาพด้านเดียว แล้วทดสอบด้วยชิ้นตัวอย่างขนาดเล็ก

5.5 ผลการเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์ขนาดเล็ก

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ขนาดเล็กขนาด $10 \times 10 \times 10$ มิลลิเมตร โดยหากทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ระดับความลึกที่ 1 ซึ่งเป็นระดับความลึกที่สามารถเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าความลึกระดับอื่น สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ขนาดเล็กได้ดังรูป 5.19



รูป 5.19 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ขนาดเล็กที่ระยะเวลาและระดับความลึกจากผิวสัมผัส

(ก) มอร์ตาร์ขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติ

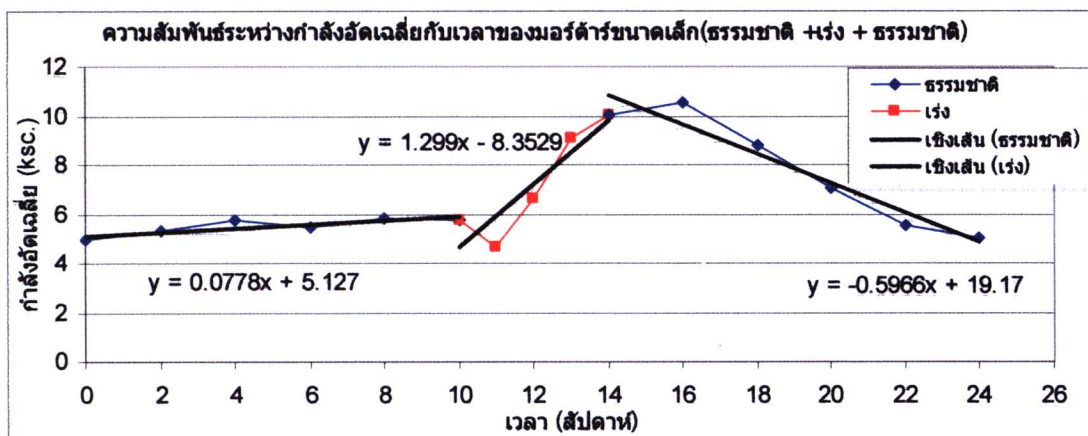
(ข) มอร์ตาร์ขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามแบบเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษากำลักรับแรงอัดของมอร์ตาร์ขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติในระดับความลึกที่ 1 ที่ระยะเวลาทดสอบ 24 สัปดาห์ ดังรูป 5.19(ก-บน) พบว่า หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพแบบธรรมชาติในเวลา 24 สัปดาห์ กำลักรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในระดับความลึกที่ 1 มีแนวโน้มของกำลักรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา (รูป 5.19 ข-บน) และเมื่อเปรียบเทียบกับความลึกระดับอื่นในสัปดาห์ที่ 24 ดังรูป 5.19 (ก-ล่าง) จะเห็นได้ว่ามีกำลักรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่า การทดสอบการเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลา 24 สัปดาห์ ยังไม่เกิดการกัดกร่อนที่ผิวสัมผัส

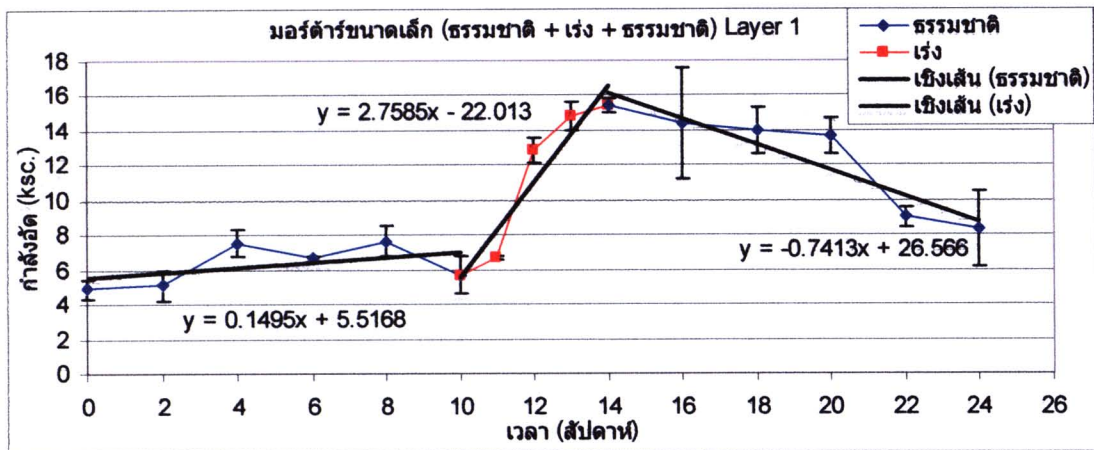
และผลกำลักรับแรงอัดของมอร์ตาร์ขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยาในระดับความลึกที่ 1 ดังรูป 5.19(ข-บน) พบว่า ในช่วง 12 สัปดาห์แรก มีแนวโน้มของกำลักรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่หลังจากสัปดาห์ที่ 12 มีค่ากำลักรับแรงอัดเท่ากับศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับรูป 5.19(ข-ล่าง) คือในเวลาทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา 24 สัปดาห์ กำลักรับแรงอัดของมอร์ตาร์ระดับความลึกที่ 1 จะเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าความลึกระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับระดับความลึกจากผิวหน้าและระยะเวลาการใช้งาน โดยที่กำลักรับแรงอัดที่ผิวนอกสุดจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อระยะเวลาผ่านไป

ส่วนผลกำลักรับแรงอัดของมอร์ตาร์ขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติ สลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา นำมาพรีดิกกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลักรับแรงอัดเฉลี่ยทั้ง 4 ความลึกของมอร์ตาร์กับเวลาการทดสอบได้ดังรูป 5.20 และพิจารณาที่ความลึกระดับที่ 1 ซึ่งเป็นระดับความลึกที่สามารถเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าความลึกระดับอื่น สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังรูป 5.21



รูป 5.20 ความสัมพันธ์กำลักรับแรงอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา



รูป 5.21 ความสัมพันธ์ก้างอัดรับแรงอัดของมอดูลขนาดเล็กระดับความลึกที่ 1 ที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา

จากผลก้างอัดรับแรงอัดของมอดูลขนาดเล็กที่เสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยาดังรูป 5.20 พบว่ารูปแบบของเส้นแนวโน้มทั้งสามช่วง มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์แบบ Quadratic เช่นเดียวกับผลของอิฐขนาดเล็ก คือ เส้นแนวโน้มช่วงที่ 1 มีค่าก้างอัดเพิ่มขึ้นและจะเพิ่มขึ้นได้สูงสุดในเส้นแนวโน้มช่วงที่ 2 หลังจากนั้นจะเริ่มมีก้างอัดลดลงในช่วงที่ 3 โดยระดับความลึกที่ 1 ซึ่งเป็นผิวสัมผัสยังมีค่าก้างอัดสูงกว่าค่าก้างอัดเฉลี่ยดังรูป 5.21 เนื่องจากที่ผิวสัมผัสของมอดูลยังเกิดการตกค้างของผลึกเกลืออยู่ ผลึกเกลือจึงช่วยส่งถ่ายแรงในรูปพุนทำให้ก้างอัดของมอดูลระดับความลึกที่ 1 มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย หากทำการทดสอบนานกว่านี้ จะทำให้ก้างอัดที่ผิวสัมผัสต่ำกว่าตำแหน่งความลึกที่อยู่ถัดเข้าไปเช่นเดียวกับผลการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาดังรูป 5.19(ก-ล่าง)

5.6 วิเคราะห์ผลการกักกร่อน

5.6.1 การตรวจสอบลักษณะภายนอก

การตรวจสอบลักษณะภายนอก เป็นการสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่า จากการทดสอบสามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. อิฐ

ลักษณะของอิฐก่อนการทดสอบนั้น มีผิวเรียบและไม่พบผลึกสีขาวดังรูป 3.1 หลังจากทำการทดสอบพบว่า การทดสอบการกักกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ เกิดผลึกสีขาวบนผิวของอิฐในตำแหน่งสัมผัสกับพื้นดิน ในสัปดาห์ที่ 20 ลักษณะของผลึก จะเกิดเป็นจุดสีขาวกระจายเป็นหย่อมๆ ทั่วผิวอิฐดังรูป 5.22 ส่วนการทดสอบการกักกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา เริ่มเกิดผลึกสีขาวในสัปดาห์ที่ 2 โดยมีลักษณะการเกิดผลึก 2 รูปแบบ คือ (1) เกิดเฉพาะจุดใดจุดหนึ่ง (2) เกิดผลึกเล็กๆ แพร่กระจายต่อเนื่องกันดังรูป 5.23(ก) และ 5.23(ข) ตามลำดับ



รูป 5.22 ผลึกสีขาวบนผิวอิฐหลังจากทดสอบการกักกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ



(ก)



(ข)

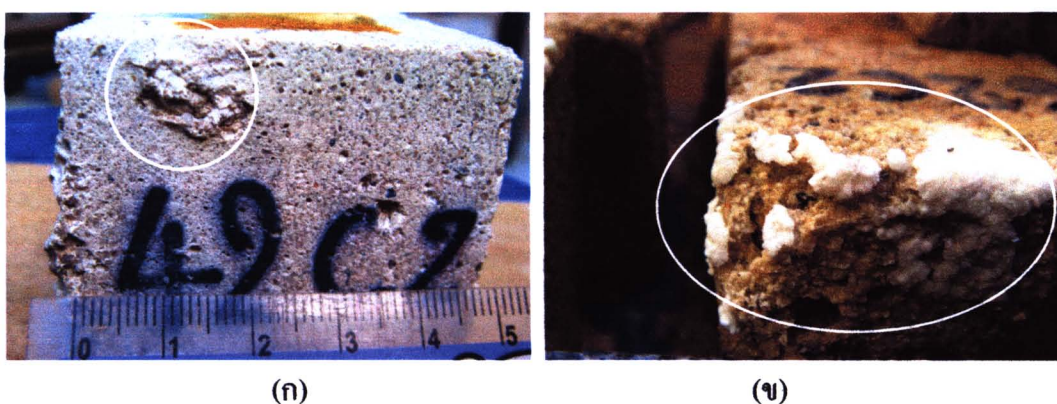
รูป 5.23 ผลึกสีขาวบนผิวอิฐหลังจากทดสอบการกักกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา

(ก) ผลึกสีขาวเกิดเฉพาะจุดใดจุดหนึ่ง

(ข) ผลึกสีขาวเกิดเป็นจุดเล็กๆ แพร่กระจายต่อเนื่องกัน

2. มอร์ตาร์

ลักษณะของมอร์ตาร์ก่อนการทดสอบ มีผิวเรียบ ไม่ร่วนและไม่พบผลึกสีขาวดังรูป 3.6 (ง) หลังจากทำการทดสอบแบบธรรมชาติ ไม่พบผลึกสีขาว แต่หลังการทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา เริ่มพบผลึกสีขาวในสัปดาห์ที่ 10 และมีลักษณะการเกิดผลึก 2 รูปแบบเช่นเดียวกับอิฐดังรูป 5.24 และในรูป 5.25 แสดงให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์ปูนหมักเกิดจากการแตกกะเทาะของเกล็ด คือ การแตกกะเทาะของเกล็ดจะเกิดบริเวณเหลี่ยมมุมก่อนดังรูป 5.25(ก) เนื่องจากเป็นส่วนพื้นที่ทับซ้อน (Overlap) ของการเกิดเกล็ดของผิวด้านที่ชนกัน ส่วนลักษณะการถูกน้ำกรดกัดจะเกิดการเสื่อมสภาพที่ผิวสัมผัสเท่านั้นทุกด้านดังรูป 5.25(ข)



รูป 5.24 ผลึกสีขาวบนผิวมอร์ตาร์หลังจากทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา

(ก) ผลึกสีขาวเกิดเฉพาะจุดใดจุดหนึ่ง

(ข) ผลึกสีขาวเกิดเป็นจุดเล็กๆ แพร่กระจายต่อเนื่องกัน



รูป 5.25 ลักษณะการถูกกัดกร่อนของมอร์ตาร์หลังการแช่กรดกำมะถันความเข้มข้นร้อยละ 3

(ก) มอร์ตาร์ปูนหมักทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้งที่อายุ 24 สัปดาห์

(ข) มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ทดสอบในสภาวะสารละลายไม่ไหลเวียนที่อายุ 12 สัปดาห์ [7]

3. ปริซึมอิฐก่อ

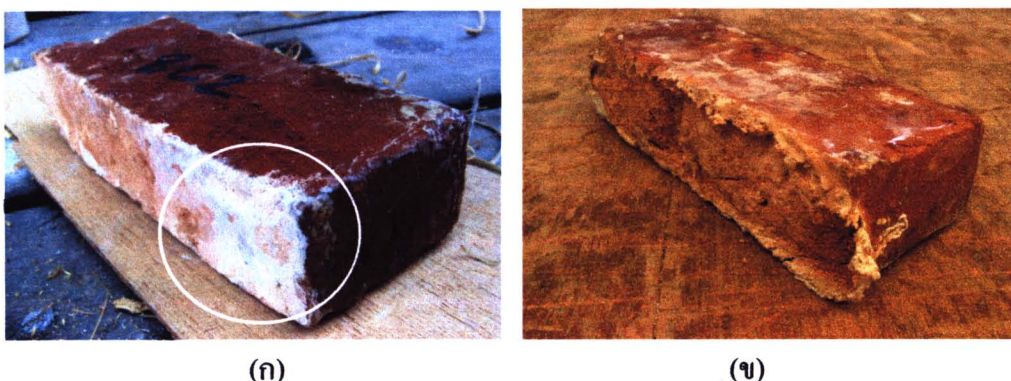
หลังจากทำการทดสอบการกักร่อนของปริซึมตามกระบวนการของธรรมชาติสลับกับแบบเร่งปฏิกิริยา พบผลึกสีขาวบนผิวอิฐของปริซึมอิฐก่อในสัปดาห์ที่ 14 และเริ่มมีการเสื่อมสภาพที่ผิวของอิฐในสัปดาห์ที่ 18 ดังรูป 5.26



รูป 5.26 ลักษณะผลึกสีขาวและการเสื่อมสภาพที่ผิวอิฐของปริซึมอิฐก่อ

4. อิฐเคลือบอีพ็อกซี่

อิฐที่เคลือบอีพ็อกซี่ใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐขนาดเล็ก ซึ่งนอกจากศึกษา กำลังอัดของอิฐจากการเสื่อมสภาพแล้ว ยังได้สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่าอีกด้วย หลังจากทำการทดสอบการกักร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ ไม่พบผลึกสีขาว แต่ในส่วนของการทดสอบการกักร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา เริ่มปรากฏผลึกสีขาวในสัปดาห์ที่ 4 ลักษณะการเกิดผลึก จะเป็นผลึกเล็กๆ แพร่กระจายต่อเนื่องกัน ดังรูป 5.27(ก) และการเสื่อมสภาพจะเกิดขึ้นเฉพาะด้านที่ไม่ได้เคลือบอีพ็อกซี่เพียงด้านเดียวดังรูป 5.27(ข)



(ก)

(ข)

รูป 5.27 ผลึกสีขาวบนผิวอิฐเคลือบอีพ็อกซี่หลังจากทดสอบการกักร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา

(ก) ผลึกสีขาวบนผิวอิฐเคลือบอีพ็อกซี่ ในสัปดาห์ที่ 4

(ข) ลักษณะการเสื่อมสภาพของอิฐเคลือบอีพ็อกซี่ ในสัปดาห์ที่ 24

5. มอร์ดาร์เคลือบอีพ็อกซี

มอร์ดาร์ที่เคลือบอีพ็อกซีก็คล้ายกับอิฐที่เคลือบอีพ็อกซี คือ หลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ ไม่พบผลึกสีขาว ในส่วนของการทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา ก็ไม่พบผลึกสีขาวเช่นกัน แต่ที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนคือ เกิดการเสื่อมสภาพของมอร์ดาร์ในด้านที่ไม่ได้เคลือบอีพ็อกซีเพียงด้านเดียวดังรูป 5.28



รูป 5.28 ลักษณะการเสื่อมสภาพของมอร์ดาร์เคลือบอีพ็อกซีที่ทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา

(ก) ลักษณะการเสื่อมสภาพของมอร์ดาร์เคลือบอีพ็อกซี ในสัปดาห์ที่ 12

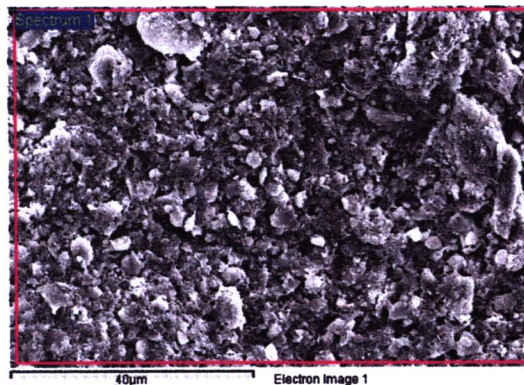
(ข) ลักษณะการเสื่อมสภาพของมอร์ดาร์เคลือบอีพ็อกซี ในสัปดาห์ที่ 24

5.6.2 การตรวจสอบโครงสร้างและปริมาณธาตุภายใน

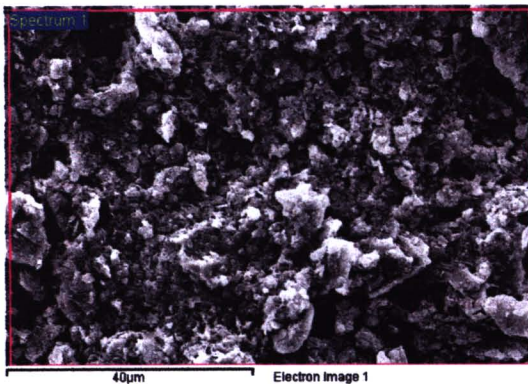
จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยการสังเกตด้วยตาเปล่า ได้ทำการศึกษาโครงสร้างภายในของอิฐและมอร์ดาร์ ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของตัวอย่างทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ ดังนี้

1. อิฐ

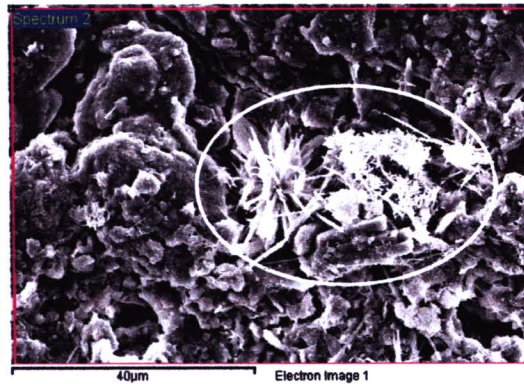
จากการตรวจสอบโครงสร้างภายในของอิฐที่ 3 ระดับความลึก ได้แก่ ความลึกระดับที่ 1 (0.25 ซม.), 3 (2.25 ซม.) และ 6 (5.25 ซม.) ดังรูป ข-1 ถึง ข-3 โดยหากทำการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของอิฐระดับความลึกที่ 1 ซึ่งเป็นระดับความลึกที่สามารถเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าความลึกระดับอื่น สามารถอธิบายได้ว่า โครงสร้างของอิฐก่อนการทดสอบ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ผลึกมีขนาดเล็กดังรูป 5.29(ก) หลังจากทดสอบการกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติในสัปดาห์ที่ 12 พบว่า ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีช่องว่างรูพรุนเพิ่มมากขึ้นดังรูป 5.29(ข) แต่หลังจากทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาในสัปดาห์ที่ 12 พบว่า โครงสร้างของผลึกมีการแตกออกและมีผลึกคล้ายแท่งเข็มเกิดแทรกขึ้นมาดังรูป 5.29(ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูป 5.29 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิฐ

(ก) ก่อนการทดสอบ

(ข) หลังการทดสอบการกักกรองตามกระบวนการของธรรมชาติในสัปดาห์ที่ 12

(ค) ผลึกเกลือหลังการทดสอบการกักกรองแบบเร่งปฏิกิริยาในสัปดาห์ที่ 12

เมื่อนำตัวอย่างอิฐข้างต้นไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุ ด้วยเครื่องวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุโดยรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) พบว่า ในอิฐก่อนการทดสอบมีคาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), อะลูมิเนียม (Al), ซิลิกอน (Si), โพแทสเซียม (K) และเหล็ก (Fe) เป็นองค์ประกอบหลัก (ตาราง 5.6) หลังการทดสอบการกักกรองตามกระบวนการของธรรมชาติ พบว่าคล้ายกับอิฐก่อนทดสอบ เพียงแต่ไม่พบคาร์บอน (C) ในบริเวณที่ศึกษา (ตาราง 5.7) แต่หลังการทดสอบการกักกรองแบบเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีธาตุแมกนีเซียม (Mg), กำมะถัน (S) และแคลเซียม (Ca) เกิดขึ้น (ตาราง 5.8) แสดงว่าผลึกสีขาวที่เกิดขึ้นอาจเป็นเกลือที่มีสารประกอบของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ซึ่งเป็นผลมาจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดกำมะถัน

ตาราง 5.6 ผล EDS ของอิฐก่อนการทดสอบ

Element	Weight%	Atomic%
C	0.68	1.20
O	46.29	61.50
Al	13.82	10.89
Si	29.23	22.12
K	3.04	1.65
Fe	6.94	2.64
Totals	100.00	

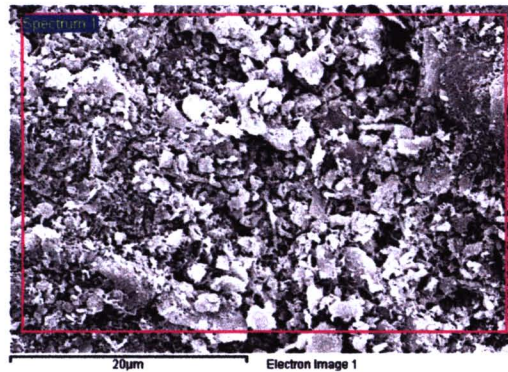
ตาราง 5.7 ผล EDS ของอิฐหลังการทดสอบ
การกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ

Element	Weight%	Atomic%
O	45.74	61.10
Al	14.73	11.67
Si	30.47	23.19
K	3.50	1.91
Fe	5.56	2.13
Totals	100.00	

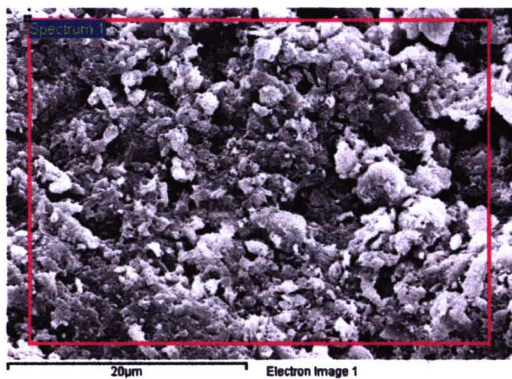
ตาราง 5.8 ผล EDS ของอิฐหลังการทดสอบ
แบบเร่งปฏิกิริยา

Element	Weight%	Atomic%
O	52.77	68.64
Mg	1.29	1.10
Al	9.29	7.16
Si	16.39	12.14
S	8.86	5.75
K	2.02	1.07
Ca	4.30	2.23
Fe	5.09	1.90
Totals	100.00	

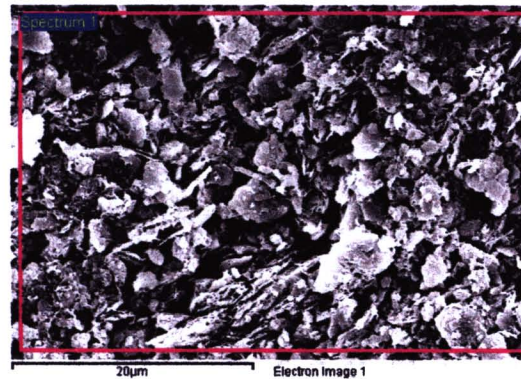
นอกจากนี้ ยังได้ทำการตรวจสอบปริมาณธาตุและโครงสร้างภายในของอิฐบนเจดีย์จริง ในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่ วัดพระธาตุคอกยสุเทพ, วัดปิ่นเส้า และวัดอุโมงค์มหาเถรจันทร์ โดยผลการตรวจสอบที่ 3 ระดับความลึก ได้แก่ ความลึกระดับที่ 1 (0.25 ซม.), 2 (1.25 ซม.) และ 3 (2.25 ซม.) ดังรูป ข-4 ถึง ข-6 และจากการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของอิฐบนเจดีย์จริงทั้งสามแห่งที่ความลึกระดับ 1 พบว่า ทั้งสามเจดีย์มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ โครงสร้างของผลึกแตกออกจากกันเป็นก้อน โดยมีขนาดของก้อนผลึกใกล้เคียงกันดังรูป 5.30



(ก)



(ข)



(ค)

รูป 5.30 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิฐเจดีย์จริง

(ก) วัดพระธาตุดอยสุเทพ

(ข) วัดปิ่นเต่า

(ค) วัดคูโม่กัมมาหารจันทร์

เมื่อนำตัวอย่างของอิฐเจดีย์จริงไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุ พบว่าอิฐของเจดีย์วัดพระธาตุดอยสุเทพมีคาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), อะลูมิเนียม (Al), ซิลิกอน (Si) และโพแทสเซียม (K) เป็นองค์ประกอบหลัก (ตาราง 5.9) ในอิฐของเจดีย์วัดปิ่นเต่า (ตาราง 5.10) และเจดีย์วัดคูโม่กัมมาหารจันทร์ (ตาราง 5.11) พบว่ามีชนิดของธาตุคล้ายกับอิฐของวัดพระธาตุดอยสุเทพ แต่มีแคลเซียม (Ca) และเหล็ก (Fe) เพิ่มขึ้นในบริเวณที่ศึกษา

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของอิฐเจดีย์จริง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอิฐที่ใช้ในงานวิจัย จะเห็นว่าชนิดของธาตุที่ตรวจพบไม่แตกต่างกัน หรือเกือบจะเหมือนกันทั้งหมด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า อิฐของเจดีย์จริงกับอิฐที่ใช้ในงานวิจัยเป็นอิฐชนิดเดียวกัน และจะมีพฤติกรรมของการเสื่อมสภาพเหมือนกับอิฐที่ใช้ในงานวิจัย ภายใต้การสัมผัสกรดกำมะถันเพียงปัจจัยเดียว

ตาราง 5.9 ผล EDS ของอิฐเจดีย์วัดพระธาตุคอกสุเทพ

Element	Weight%	Atomic%
C	6.29	10.47
O	42.87	53.52
Al	15.64	11.57
Si	32.24	22.93
K	2.96	1.51
Totals	100.00	

ตาราง 5.10 ผล EDS ของอิฐเจดีย์วัดปิ่นเต่า

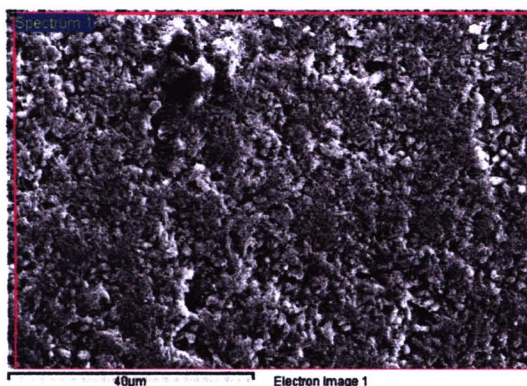
Element	Weight%	Atomic%
C	12.32	19.28
O	46.64	54.78
Al	12.22	8.51
Si	21.67	14.50
K	1.23	0.59
Ca	2.68	1.26
Fe	3.23	1.09
Totals	100.00	

ตาราง 5.11 ผล EDS ของอิฐเจดีย์วัดคูโมงค์
มหาเถรจันทร์

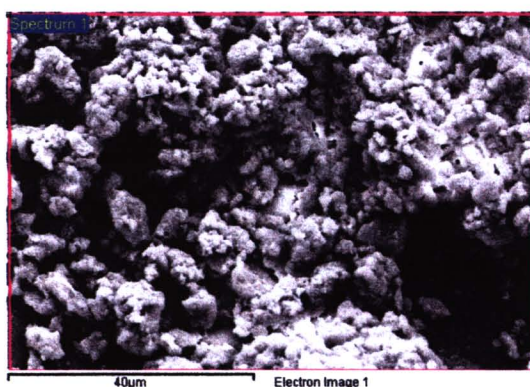
Element	Weight%	Atomic%
C	7.92	13.91
O	41.75	55.04
Al	8.90	6.96
Si	22.22	16.69
Ca	0.98	0.52
Fe	18.23	6.88
Totals	100.00	

2. มอรั๊ด

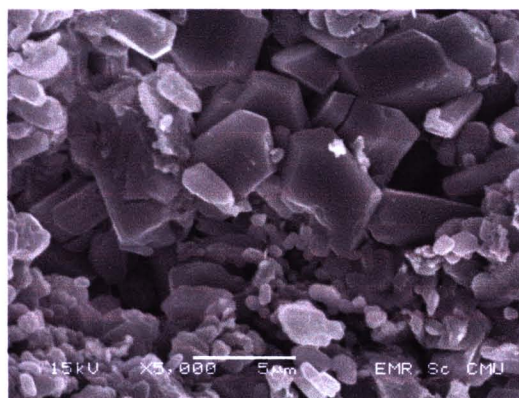
จากการตรวจสอบโครงสร้างภายในของมอรั๊ดที่ 3 ระดับความลึก ได้แก่ ความลึกระดับที่ 1 (0.50 ซม.), 3 (4.50 ซม.) และ 4 (6.50 ซม.) ในสัปดาห์ที่ 12 ดังรูป ข-7 ถึง ข-9 และ ทำการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของมอรั๊ดระดับความลึกที่ 1 พบว่า โครงสร้างของมอรั๊ดก่อนการทดสอบ เนื้อผลึกมีความละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูป 5.31(ก) หลังจากทดสอบทั้งแบบการกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติและแบบเร่งปฏิกิริยา ในสัปดาห์ที่ 12 พบว่าผลึกมีการแตกออกและมีช่องว่างรูพรุนมากขึ้นดังรูป 5.31(ข) และ 5.31(ค)ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูป 5.31 ลักษณะโครงสร้างภายในของมอร์ตาร์

(ก) ก่อนการทดสอบ

(ข) หลังการทดสอบการกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติในสัปดาห์ที่ 12

(ค) หลังการทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาในสัปดาห์ที่ 12

เมื่อนำตัวอย่างมอร์ตาร์ข้างต้นไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุ พบว่าในมอร์ตาร์ก่อนการทดสอบมีคาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), ซิลิกอน (Si), และแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบหลัก (ตาราง 5.12) หลังการทดสอบการกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ พบว่าคล้ายกับมอร์ตาร์ก่อนทดสอบ แต่มีอะลูมิเนียม (Al) และคลอรีน (Cl) เพิ่มขึ้นในบริเวณที่ศึกษา (ตาราง 5.13) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าอาจเป็นเกลือที่มีสารประกอบของแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ส่วนหลังการทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยา ไม่สามารถตรวจหาชนิดของธาตุได้ เนื่องจากหลังการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา ทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเปื่อยยุ่ยและผิววัสดุไม่เรียบ จึงส่งผลทำให้มอร์ตาร์ไม่นำไฟฟ้า ในระหว่างทำการวิเคราะห์

ตาราง 5.12 ผล EDS ของมอร์ตาร์ก่อนการทดสอบ

Element	Weight%	Atomic%
C	6.51	11.49
O	48.72	64.57
Si	1.15	0.87
Ca	43.63	23.08
Totals	100.00	

ตาราง 5.13 ผล EDS ของมอร์ตาร์หลังการทดสอบการกัดกร่อนตามกระบวนการของธรรมชาติ

Element	Weight%	Atomic%
C	27.29	39.90
O	40.04	43.96
Al	0.97	0.63
Si	8.43	5.27
Cl	0.83	0.41
Ca	22.44	9.84
Totals	100.00	

5.6.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบภายใน

จากการตรวจสอบองค์ประกอบภายในของวัสดุตัวอย่าง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของตัวอย่างทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ ดังนี้

1. อิฐ จากการตรวจสอบองค์ประกอบภายในของอิฐก่อน และหลังการทดสอบที่ 3 ระดับความลึก ได้แก่ ความลึกระดับที่ 1 (0.25 ซม.), 3 (2.25 ซม.) และ 6 (5.25 ซม.) ดังรูป ข=18 ถึง ข=26 นำมาทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบได้ดังตาราง 5.14

ตาราง 5.14 เปรียบเทียบองค์ประกอบภายในของอิฐก่อน และหลังการทดสอบ

ความลึก	อิฐก่อนการทดสอบ	อิฐหลังการทดสอบ		ผลิตภัณฑ์	
		ธรรมชาติ	เร่งปฏิกิริยา	ธรรมชาติ	เร่งปฏิกิริยา
ระดับที่1 0.25 ซม.	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	CaCO ₃	CaSO ₄ ·2H ₂ O Ca(SO ₄)(H ₂ O) _{0.5}
	KAISi ₃ O ₈	KAISi ₃ O ₈	KAISi ₃ O ₈		
	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂		
	Ca ₄ Si ₅ O _{13.5} (OH) ₂	Na(AlSi ₃ O ₈)	CaSO ₄ ·2H ₂ O		
		CaCO ₃	Ca(SO ₄)(H ₂ O) _{0.5}		
ระดับที่3 2.25 ซม.	SiO ₂ , SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	CaCO ₃	-
	KAISi ₃ O ₈	KAISi ₃ O ₈	KAISi ₃ O ₈		
	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂		
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Na(AlSi ₃ O ₈)	Na(AlSi ₃ O ₈)		
		CaCO ₃			
ระดับที่6 5.25 ซม.	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	-	-
	KAISi ₃ O ₈	KAISi ₃ O ₈	KAISi ₃ O ₈		
	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂		
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Na(AlSi ₃ O ₈)			

จากตาราง 5.14 มีองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบดังนี้

(1) องค์ประกอบภายในของอิฐก่อนการทดสอบ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO₂), คริสโตบาไลต์ (Cristobalite, SiO₂), ออร์โทเคลส (Orthoclase, KAISi₃O₈), มัสโคไวต์ (Muscovite, KAl₂Si₃AlO₁₀(OH)₂), แคลเซียมซิลิเกต ไฮดรอกไซด์ (Calcium Silicate Hydroxide, Ca₄Si₅O_{13.5}(OH)₂) และเคโอลิไนต์ (Kaolinite, Al₂Si₂O₅(OH)₄)

(2) องค์ประกอบภายในของอิฐหลังการทดสอบแบบธรรมชาติ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO_2), ออร์โทเคลส (Orthoclase, KAlSi_3O_8), มัสโคไวต์ (Muscovite, $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), แอลไบต์ (Albite, $\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$), และแคลไซต์ (Calcite, CaCO_3)

(3) องค์ประกอบภายในของอิฐหลังการทดสอบแบบแรงปฏิกิริยา ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO_2), ออร์โทเคลส (Orthoclase, KAlSi_3O_8), มัสโคไวต์ (Muscovite, $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), แอลไบต์ (Albite, $\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$) และแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (Calcium Sulfate Hydrate, $\text{Ca(SO}_4\text{)(H}_2\text{O)}_{0.5}$)

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบภายในของอิฐก่อนและหลังการทดสอบพบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของดินตามธรรมชาติที่เกิดจากหินและแร่ต่างๆ [18] โดยที่

SiO_2 เป็นองค์ประกอบของดินที่มาจากกลุ่มแร่ซิลิกา

KAlSi_3O_8 และ $\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$ เป็นองค์ประกอบของดินที่มาจากกลุ่มแร่เฟลด์สปาร์

$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ เป็นองค์ประกอบของดินที่มาจากกลุ่มแร่ไมกา

$\text{Ca}_4\text{Si}_5\text{O}_{13.5}(\text{OH})_2$ และ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ เป็นองค์ประกอบของดินที่มาจากกลุ่มแร่ดินเหนียว

ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเนื้ออิฐพบว่าหลังการทดสอบ มี แคลไซต์ (CaCO_3), ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ($\text{Ca(SO}_4\text{)(H}_2\text{O)}_{0.5}$) เกิดขึ้น นั่นคือเกิดเกลือยิปซัมหรือเกลือแคลเซียมซัลเฟตในความถี่ระดับที่ 1 และ 3

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเนื้ออิฐ คือ แคลไซต์ (CaCO_3) และยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า เกลือแคลไซต์และเกลือยิปซัมเป็นเกลือที่พบมากบนโบราณสถาน [2, 10]

นอกจากนี้ จากการตรวจสอบองค์ประกอบภายในของอิฐบนเจดีย์จริงที่ 3 ระดับความลึก ได้แก่ ความถี่ระดับที่ 1 (0.25 ซม.), 2 (1.25 ซม.) และ 3 (2.25 ซม.) ดังรูป ข-27 ถึง ข-35 นำมาสรุปองค์ประกอบได้ดังตาราง 5.15



ตาราง 5.15 องค์ประกอบภายในของอิฐบนเจดีย์จริง

ความลึก	อิฐเจดีย์วัดพระธาตุคอกยสุเทพ	อิฐเจดีย์วัดปิ่นเต่า	อิฐเจดีย์วัดอุโมงค์มหาเถรจันทร์
ระดับที่ 1 0.25 ซม.	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ , KAlSi ₃ O ₈ KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂ CaCO ₃	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ ,	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂ CaSO ₄ ·2H ₂ O
ระดับที่ 2 1.25 ซม.	SiO ₂ , SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂ CaCO ₃	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ , KAlSi ₃ O ₈ KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂ Na(AlSi ₃ O ₈)
ระดับที่ 3 2.25 ซม.	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ , KAlSi ₃ O ₈ KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂ CaCO ₃	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ , KAlSi ₃ O ₈ KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂ Na(AlSi ₃ O ₈)
เกลือที่พบ	CaCO ₃	-	CaSO ₄ ·2H ₂ O

องค์ประกอบภายในของอิฐบนเจดีย์จริงที่วิเคราะห์พบมีดังนี้

(1) องค์ประกอบภายในของอิฐเจดีย์วัดพระธาตุคอกยสุเทพ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO₂), คริสโทปาลไลต์ (Cristobalite, SiO₂), ออร์โทเคลส (Orthoclase, KAlSi₃O₈), ไมโครไคลน์ (Microcline, KAlSi₃O₈) มัสโคไวต์ (Muscovite, KAl₂Si₃AlO₁₀(OH)₂) และแคลไซต์ (Calcite, CaCO₃)

(2) องค์ประกอบภายในของอิฐเจดีย์วัดปิ่นเต่า ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO₂) และออร์โทเคลส (Orthoclase, KAlSi₃O₈)

(3) องค์ประกอบภายในของอิฐเจดีย์วัดอุโมงค์มหาเถรจันทร์ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO₂), ออร์โทเคลส (Orthoclase, KAlSi₃O₈), ไมโครไคลน์ (Microcline, KAlSi₃O₈) มัสโคไวต์ (Muscovite, KAl₂Si₃AlO₁₀(OH)₂) และยิปซัม (Gypsum, CaSO₄·2H₂O)

จากตาราง 5.15 วิเคราะห์พบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสถานะจริงของธรรมชาติ คือ พบเกลือยิปซัม (CaSO₄·2H₂O) ในระดับความลึกที่ 1 ของอิฐเจดีย์วัดอุโมงค์มหาเถรจันทร์ และพบเกลือแคลไซต์ (CaCO₃) ในอิฐของวัดพระธาตุคอกยสุเทพ และหากพิจารณาองค์ประกอบโดยรวมของอิฐเจดีย์จริง จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของดินตามธรรมชาติ ซึ่งคล้ายกับอิฐที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า

อิฐของเจดีย์จริงกับอิฐที่ใช้ในงานวิจัยเป็นอิฐชนิดเดียวกัน ทำมาจากดินชนิดเดียวกัน และจะมีพฤติกรรมของการเสื่อมสภาพเหมือนกับอิฐที่ใช้ในงานวิจัย ภายใต้การสัมผัสกรดกำมะถันเพียงปัจจัยเดียว

2. มอร์ต้าร์ จากการตรวจสอบองค์ประกอบภายในของมอร์ต้าร์ก่อน และหลังการทดสอบที่ 3 ระดับความลึก ได้แก่ ความลึกระดับที่ 1 (0.50 ซม.), 3 (4.50 ซม.) และ 4 (6.50 ซม.) ดังรูป ข-36 ถึง ข-44 นำมาทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบได้ดังตาราง 5.16

ตาราง 5.16 เปรียบเทียบองค์ประกอบภายในของมอร์ต้าร์ก่อน และหลังการทดสอบ

ความลึก	มอร์ต้าร์ก่อน การทดสอบ	มอร์ต้าร์หลังการทดสอบ		ผลิตภัณฑ์	
		ธรรมชาติ	เร่งปฏิกิริยา	ธรรมชาติ	เร่งปฏิกิริยา
ระดับที่1 0.50 ซม.	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ CaCO ₃ Ca(OH) ₂	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ CaCO ₃ Ca(OH) ₂ Na(AlSi ₃ O ₈) CaSO ₄ ·2H ₂ O	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ CaCO ₃ CaSO ₄ ·2H ₂ O CaSO ₄ ·0.62H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O CaSO ₄ ·0.62H ₂ O
ระดับที่3 4.50 ซม.	SiO ₂ CaCO ₃ Ca(OH) ₂	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ CaCO ₃ Ca(OH) ₂ CaSO ₄ ·2H ₂ O	SiO ₂ , SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ CaCO ₃ Ca(OH) ₂ CaSO ₄ ·2H ₂ O Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ SO ₄ CaAl ₂ (Si ₂ Al ₂)O ₁₀ (OH) ₂	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O
ระดับที่4 6.50 ซม.	SiO ₂ CaCO ₃ Ca(OH) ₂ Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ SO ₄	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ CaCO ₃ Ca(OH) ₂	SiO ₂ KAlSi ₃ O ₈ CaCO ₃ Ca(OH) ₂ CaSO ₄ ·2H ₂ O CaAl ₂ (Si ₂ Al ₂)O ₁₀ (OH) ₂	-	CaSO ₄ ·2H ₂ O

จากตาราง 5.16 มีองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบดังนี้

(1) องค์ประกอบภายในของมอร์ต้าร์ก่อนการทดสอบ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO_2), ไมโครไคลน์ (Microcline, KAlSi_3O_8), แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3), ปอร์ตแลนด์ (Portlandite, Ca(OH)_2) และยิลลิไมต์ (Yeelimite, $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4$)

(2) องค์ประกอบภายในของมอร์ต้าร์หลังการทดสอบแบบธรรมชาติ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO_2), ไมโครไคลน์ (Microcline, KAlSi_3O_8), แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3), แอลไบต์ (Albite, $\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$), ปอร์ตแลนด์ (Portlandite, Ca(OH)_2) และยิปซัม (Gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

(3) องค์ประกอบภายในของมอร์ต้าร์หลังการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz, SiO_2), คริสโทบาไลต์ (Cristobalite, SiO_2), ไมโครไคลน์ (Microcline, KAlSi_3O_8), แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3), ปอร์ตแลนด์ (Portlandite, Ca(OH)_2), ยิปซัม (Gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ยิลลิไมต์ (Yeelimite, $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4$), แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (Calcium Sulfate Hydrate, $\text{CaSO}_4 \cdot 0.62\text{H}_2\text{O}$) และมาร์การิไรต์ (Margarite, $\text{CaAl}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบภายในของมอร์ต้าร์ก่อนและหลังการทดสอบ สามารถอธิบายองค์ประกอบต่างๆ ที่วิเคราะห์พบได้ดังนี้

CaCO_3 และ Ca(OH)_2 เกิดจากกระบวนการผลิตและหมักปูนขาว ดังสมการที่ 1

SiO_2 เป็นองค์ประกอบของดินที่มาจากกลุ่มแร่ซิลิกา [18]

KAlSi_3O_8 และ $\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$ เป็นองค์ประกอบของดินที่มาจากกลุ่มแร่เฟลด์สปาร์

$\text{CaAl}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ เป็นองค์ประกอบของดินที่มาจากกลุ่มแร่ไมกา

ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเนื้อมอร์ต้าร์ คล้ายกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเนื้ออิฐ คือ หลังการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยา มี ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.62\text{H}_2\text{O}$) เกิดขึ้น นั่นคือเกิดเกลือยิปซัมหรือเกลือแคลเซียมซัลเฟต โดยเกลือยิปซมนั้น เกิดขึ้นทั้งมอร์ต้าร์ที่ทดสอบแบบธรรมชาติและแบบเร่งปฏิกิริยา

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเนื้อมอร์ต้าร์ คือ ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดซัลฟูริก ทำให้เกิดเกลือชนิดเดียวกับธรรมชาติและมีกลไกของการเสื่อมสภาพแบบเดียวกับธรรมชาติ

นอกจากนี้ จากการศึกษาการกัดกร่อนและวิเคราะห์องค์ประกอบภายในของวัสดุ 4 ประเภท ของโบราณสถานที่ยังหวัคพระนครศรีอยุธยา [8] ได้ผลการวิเคราะห์ดังตาราง 5.17 โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบมีความสอดคล้องกัน คือ ออกไซด์ของซัลเฟอร์ในธรรมชาติทั้งที่อยู่

รูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือกรดกำมะถัน ก็สามารถทำให้เกิดเกลียวขรุขระในเนื้อมอร์ตาร์ปูนหมัก และสร้างความเสียหายให้กับโบราณสถานที่สร้างจากอิฐดินเผาได้เช่นกัน แต่ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ได้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ได้โดยตรง เนื่องจากสมมติฐานของการทดสอบต่างกัน

ตาราง 5.17 เปรียบเทียบองค์ประกอบของวัสดุก่อน และหลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ [8]

วัสดุตัวอย่าง	ก่อนสัมผัส	หลังสัมผัส	ผลิตภัณฑ์
	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	
อิฐเก่า	ควอร์ซ, ไคเซไรต์	ควอร์ซ, ไคเซไรต์	*
อิฐปัจจุบัน	ควอร์ซ	ควอร์ซ, ไคเซไรต์	ไคเซไรต์
ปูนปั้นเก่า	ควอร์ซ, แคลไซต์, แอนไฮไดต์	ควอร์ซ, แคลไซต์, แอนไฮไดต์	*
ปูนปั้นปัจจุบัน	ควอร์ซ, แคลไซต์, พอร์ตแลนด์ไดต์	ควอร์ซ, แคลไซต์, แอนไฮไดต์, ยิปซัม	แอนไฮไดต์, ยิปซัม

หมายเหตุ * วิเคราะห์ไม่พบองค์ประกอบอื่นซึ่งเพิ่มขึ้นมาจากองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบก่อนที่วัสดุตัวอย่างจะสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์