สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 วัสดุก่อและวัสดุเชื่อมประสานแบบล้านนาโบราณ

มนุษย์รู้จักผลิตวัสดุก่อและวัสดุเชื่อมประสานขึ้นมา เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างมาเป็นเวลาช้านานแล้ว ซึ่งสังเกตได้จากโบราณสถานต่างๆ ทางประวัติศาสตร์ เช่น วิหาร เจดีย์ และกำแพงเมือง เป็นต้น ปัจจุบันนี้การใช้วัสดุก่อและวัสดุเชื่อมประสานแบบโบราณมีให้เห็นกันน้อยมาก โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้ในการบูรณะซ่อมแซม เพื่อให้มีรูปแบบลักษณะที่ใกล้เคียงกับของเดิมมากที่สุด

2.1.1 วัสดุก่อ

อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้นด้วยวัสดุจากธรรมชาติมาทำเป็นก้อนสำหรับใช้ในการก่อสร้างอาคารนับพันปีมาแล้ว การใช้อิฐครั้งแรกนั้นเชื่อกันว่าเริ่มต้นในสมัยอียิปต์โบราณ ซึ่งใช้ดินโคลนในแม่น้ำไนล์ มานวดแล้วปั้นให้เป็นก้อนตามขนาดที่ต้องการแล้วนำไปตากแดดให้แห้งโดยไม่ได้เผาให้สุก เนื่องมาจากสภาพทางภูมิศาสตร์ที่มีฝนตกน้อย จึงไม่เกิดปัญหาเรื่องการชะล้างของน้ำฝน และในช่วงเวลาเดียวกันบริเวณลุ่มแม่น้ำไทกริส ยูเฟรติส มีการทำอิฐที่เผาให้สุกแล้วนำไปใช้งานในการก่อสร้างอาคารต่างๆ มากมาย อิฐที่เผาให้สุกแล้วนี้สามารถทนทานต่อการชะล้างของน้ำฝน และการเปลี่ยนแปลงของสภาพดินฟ้าอากาศ

จากหลักฐานทางโบราณคดี ในดินแดนล้านนาพบว่า มีการใช้อิฐในการก่อสร้างมาช้านานแล้วเช่นกันตั้งแต่ในสมัยรัฐหริภุญไชย ซึ่งเป็นรัฐที่เคยมีอำนาจในดินแดนแถบนี้มาก่อนก็มีการใช้อิฐในการก่อสร้างอาคาร โดยเฉพาะ อาคารและสถาปัตยกรรมในพุทธศาสนา ซึ่งได้แก่ เจดีย์ ต่อมาในสมัยล้านนา มีการใช้อิฐในการก่อสร้างอย่างกว้างขวาง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอาคารศาสนสถาน เช่น วิหารและเจดีย์ โดยอิฐที่ใช้ในการก่อสร้างของล้านนานี้มีชื่อเรียกในภาษาพื้นเมืองว่า “ดินกี่” ซึ่งเป็นอิฐที่ทำด้วยมือ ซึ่งมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับอิฐในปัจจุบัน และขนาดของอิฐแต่ละก้อนจะไม่เท่ากัน ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เนื่องมาจากสาเหตุหลายประการเช่น ขนาดของแบบไม่เท่ากัน การอัดดินเข้าในแบบไม่แน่น การหดตัวของโคลนที่ใช้ทำอิฐไม่เท่ากันเพราะ ส่วนผสมไม่สม่ำเสมอ ซึ่งก็สามารถใช้งานในการก่อสร้างได้เป็นอย่างดี [3]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 30 พ.ย. 2554
เลขทะเบียน 242700
เลขเรียกหนังสือ

ในการผลิตอิฐหรือดินกี่ของล้านนา มีกรรมวิธีและขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเลือกดิน

ดินที่ใช้ทำอิฐนั้นจะต้องไม่มีทรายเจือปนมากเกินไปหรือไม่เป็นดินเหนียวมากเกินไป ถ้ามีทรายมากก็จะทำให้อิฐนั้นล่อน ร่วน แต่ถ้าเป็นดินเหนียวมากเกินไป เมื่อตากแดดก็จะเกิดการแตกร้าวมาก ซึ่งวิธีทดสอบที่ดีที่สุดคือการทำตัวอย่างในปริมาณน้อยก่อน

คุณสมบัติของส่วนผสมต่างๆ ในอิฐมีแตกต่างกันออกไป [8] สามารถอธิบายได้ดังนี้

1.1 ดินเหนียว มีคุณสมบัติช่วยให้เม็ดดินเกาะกันเป็นก้อนได้คงที่ในระหว่างที่ยังเป็นอิฐดิบ (อิฐที่ยังไม่เผา)

1.2 ทราย มีคุณสมบัติป้องกันการแตกร้าว การหดตัว และการบิดตัว

1.3 แร่ธาตุอื่นๆ โดยทั่วไปแล้วดินจะมีธาตุต่างๆ รวมกันมากกว่า 100 ธาตุ แต่จะมีธาตุที่พบมากและคงทนต่อสภาพทั่วไปของเปลือกโลกและผิวโลกเพียง 8 ธาตุเท่านั้น คือ ออกซิเจน (O), ซิลิกอน (Si), อะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe), แคลเซียม (Ca), โซเดียม (Na), โพแทสเซียม (K) และแมกนีเซียม (Mg) [18] ซึ่งธาตุเหล่านี้จะช่วยในการแปรสภาพของสารในดิน ในขณะที่ถูกความร้อนเผาให้สุก สำหรับพวกอ๊อกไซด์จะช่วยให้อิฐมีสีต่างๆ เมื่อเผาจนสุกแล้ว โดยแร่ธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่ในดินเหนียว ได้แก่

- ธาตุปูน ถ้ามีอยู่ในดินเหนียวมากๆ เมื่ออิฐที่เผาแล้วถูกน้ำจะแตกแยกออกจากกัน
- ธาตุซิลิเกต หรือ ปูนขาวซิลิเกต ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้อิฐบิดงอเสียรูปเมื่อเผา
- ธาตุแมกนีเซียม ถ้ามีน้อยก็ไม่ให้ผลอย่างไร เพียงแต่ทำให้อิฐมีสีน้ำตาล บางทีใช้เติมในดินทำให้แข็งแรง ใช้ทำกระเบื้องปูพื้น ปูทางเท้า และเฉลียง
- ทราย ถ้ามีผสมอยู่เกินกว่าร้อยละ 25 จะทำให้อิฐเปราะไม่แข็งหักง่าย
- สนิมเหล็ก และ ซัลไฟด์ของเหล็ก ถ้าพบว่ามีอยู่ในดินเหนียวเกินกว่าร้อนละ 2 - 3 ก็ไม่เหมาะสำหรับผลิตอิฐทนไฟ สนิมเหล็ก หรือ เหล็กอ๊อกไซด์ทำหน้าที่เป็นวัสดุผสาน (Flux) เพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงให้กับอิฐ ทำให้อิฐมีสีแดง เป็นสัดส่วนกับปริมาณเหล็กอ๊อกไซด์ปูนขาว หรือธาตุซิลิเกต และถ้ามีมากกว่าสนิมเหล็ก อิฐจะมีสีเหลืองและหดตัวมาก

2. การขุดดินและย่ำดิน

ดินที่จะใช้ทำอิฐนั้นต้องผ่านการแช่น้ำทิ้งไว้ ยิ่งแช่น้ำนานเท่าไหร่ยิ่งดีเท่านั้น จากนั้นนำมาเลือกเอาเศษผงและสิ่งปะปนอื่นๆ เช่น กรวด ทรายที่ปนอยู่ออกให้หมด แล้วนำมาย่ำให้ละเอียดจนเข้ากันดี โดยอาจต้องเติมขี้เถ้าลงไปขณะนวด เพื่อไม่ให้อิฐติดแบบพิมพ์ไม้ เมื่ออัดดินเข้าแบบ ในขั้นตอนนี้ถ้าหากดินแห้งเกินไป ให้เติมน้ำลงไปให้พอเหมาะ และทำงานได้สะดวก โดยให้มีความเหลวพอที่จะสามารถเทลงไปในแบบไม้ได้สะดวก

3. การทำให้เป็นรูปแบบที่ต้องการ

แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปอิฐนั้นมีลักษณะเป็นกรอบไม้ ด้านบนและด้านล่างโล่ง ไม้จะที่นำมาทำไม้แบบนั้นควรเป็นไม้ที่มีคุณสมบัติไม่บิดงอเมื่อถูกน้ำหรือความชื้น ด้านในไสให้เรียบ ขนาดของไม้แบบนี้จะมีขนาดใหญ่กว่า ขนาดของอิฐที่ต้องการ ประมาณ 5 - 10% เนื่องจากเมื่อเอาอิฐที่ขึ้นรูปแล้วไปตากแดด ขนาดของอิฐที่แห้งแล้วจะหดเล็กลง

เมื่อแบบพร้อมแล้วเตรียมพื้นราบซึ่งใช้ได้ทั้งที่โล่งกลางแดดและในที่ร่ม เอาไม้แบบชุบน้ำและวางราบลง ตักโคลนที่ผสมแล้วเทลงในแบบ ใช้ไม้ตบให้โคลนเข้าไปอัดแน่นในแบบให้ทั่ว แล้วปาดส่วนบนให้เสมอขอบไม้แบบ แล้วยกไม้แบบออก นำไม้แบบชุบน้ำแล้วทำซ้ำไปเรื่อยๆ

4. การตากแดดให้แห้งสนิท

เมื่อถอดแบบออกแล้วต้องตากแดดให้แห้งสนิท สำหรับระยะเวลาในการตากแดดนั้นขึ้นอยู่กับฤดูกาลและสภาพของอากาศ ถ้าในฤดูร้อนอาจใช้เวลาประมาณ 3 - 5 วัน ในฤดูอื่น เฉลี่ยๆ โดยทั่วๆ ไปประมาณ 7 - 8 วัน ยกเว้นในฤดูฝนจะไม่เหมาะในการทำอิฐเพราะขณะตากแดด ฝนอาจจะตกลงมาทำให้อิฐที่ตากอยู่เสียหาย

5. การถากแต่งอิฐที่เผาให้เรียบร้อย

เมื่ออิฐที่ตากแห้งแล้ว อิฐแต่ละก้อนจะยังไม่เรียบร้อย ส่วนใหญ่มักจะมีส่วนเกินออกมาจากด้านข้าง เนื่องจากเนื้อดินที่เกินออกมาขณะอัดเข้าแบบ จึงต้องใช้มีดถากแต่งก้อนอิฐให้เรียบร้อยและมีรูปร่างเสมอกัน ก่อนที่จะนำเข้าเตาเผา

6. การเผาอิฐ

เมื่อถากแต่งอิฐที่ยังไม่ได้เผาเรียบร้อยแล้ว นำอิฐมาวางกองเป็นแถว แถวหนึ่งกว้างเท่ากับความยาวของแท่งดินที่จะเผาเป็นอิฐ โดยเว้นระยะห่างระหว่างแถวไว้เท่าๆ กัน เพื่อใส่แกลบลงไปในระหว่างแถว การเรียงขนาดทั้งกองทั้งหมดจะมีขนาดเท่าใดนั้นแล้วแต่ปริมาณของแท่งดินที่จะเผาในครั้งหนึ่งๆ โดยขนาดที่ปฏิบัติทั่วไปในปัจจุบันคือกองกว้างประมาณ 4 เมตร ยาวประมาณ 6 - 7 เมตร ความสูงของกองประมาณ 1.6 เมตร ซึ่งถ้ากองกว้างและสูงเกินไปจะทำให้การเติมแกลบขณะเผาไม่สะดวก เมื่อกองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ที่ด้านนอกทั้ง 4 ด้านใช้อิฐที่เผาสุกแล้วกองล้อมรอบไว้เพื่อป้องกันความร้อนไม่ให้กระจายออกไป เสร็จแล้วเทแกลบลงไปในช่องที่เว้นระยะไว้นั้น และโรยแกลบให้ทั่วส่วนบนของกองให้หนาประมาณ 7 - 10 เซนติเมตร แล้วจุดไฟให้แกลบไหม้ แกลบจะค่อยๆ ไหม้ลามไปทั่วกอง เมื่อแกลบไหม้และยุบลงต้องคอยเติมแกลบให้ได้ระดับเสมอ ทำตามลักษณะนี้ต่อเนื่อง 15 วัน แล้วปล่อยให้ไฟดับเอง แล้วรื้อกองออกก็จะได้อิฐตามที่ต้องการ

การเผาอิฐนี้นอกจากจะเผาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงแล้ว ยังมีการเผาอิฐโดยใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง การเผาด้วยฟืนนี้จะต้องเผาในเตาซึ่งมีลักษณะเป็นเตาสี่เหลี่ยมซึ่งก่อด้วยอิฐที่เผาสุกแล้ว

โดยมีความหนาสองชั้นของก้อนอิฐเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนกระจายออกไป เตาเผานี้มีช่องสำหรับใส่ฟืนอยู่ด้านล่างซึ่งจะต้องเติมฟืนอยู่เรื่อยๆ เพื่อให้อุณหภูมิที่เผาคงที่ การเผาอิฐด้วยเตานี้จะใช้เวลาประมาณหนึ่งวันกับหนึ่งคืน เสร็จแล้วจึงหยุดไฟแล้วปล่อยให้ไฟค่อยๆ ดับและอบทิ้งไว้ในเตาให้ค่อยๆ เย็นลง ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2 – 3 วัน ก็จะได้อิฐตามที่ต้องการ อิฐที่เผาด้วยเตานี้จะมีคุณภาพและความแข็งแรงทนทานมากกว่าการเผาด้วยแกลบ

ขนาดอิฐมาตรฐานที่ใช้ในการก่อสร้างวิหารของล้านนาที่พบมีอยู่ 2 ขนาด คือขนาด 20 × 30 เซนติเมตร และขนาดเล็ก 15 × 29 เซนติเมตร สำหรับรูปแบบของการก่ออิฐนั้นในงานก่อสร้างวิหารของล้านนา พบว่าไม่มีรูปแบบที่ตายตัวแน่นอน โดยจะขึ้นอยู่กับช่างก่ออิฐ นอกจากนั้น จากการเก็บข้อมูลภาคสนามในโครงการบูรณะเสริมความมั่นคงวิหาร วัดต้นเกว๋น พบว่าในการก่ออิฐในแต่ละชั้นไม่มีการวัดระดับที่แม่นยำนัก โดยแนวการก่อในแต่ละชั้นมีความเหลื่อมล้ำกันอยู่มาก และยังพบเศษกระเบื้องดินเผา สำหรับมุงหลังคา หรือกระเบื้องดินขอ แทรกอยู่ในชั้นปูนสอของการก่ออิฐอยู่เป็นจำนวนมาก สันนิษฐานว่าน่าจะเป็นวิธีการแก้ปัญหาชั้นอิฐที่ไม่ได้ระดับของชั้นก่ออิฐ โดยใช้เศษกระเบื้องดินเผามุงหลังคาหรือกระเบื้องดินขอ สอดเสริมเข้าไปในแต่ละชั้นระหว่างการก่อผนังก่อนที่จะปาดปูนสอ

2.1.2 วัสดุเชื่อมประสาน

ตั้งแต่สมัยโบราณ มนุษย์รู้จักนำวัสดุต่างๆ มาใช้เพื่อการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัย และเพื่อพิธีกรรมต่างๆ วัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างมี อาทิเช่น อิฐ หิน ฯลฯ วัสดุเหล่านี้ถูกใช้เป็นฐานรองรับอาคาร ใช้ก่อสร้างกำแพง ผนัง เพดาน ฯลฯ แต่ในการก่อสร้าง หากใช้วัสดุเหล่านี้เพียงวางเรียงหรือซ้อนกัน จะไม่สามารถก่อเป็นอาคารที่มีความมั่นคงได้เลย จึงจำเป็นต้องมีวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมยึดหินหรืออิฐเหล่านั้นให้ติดกัน

วัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานเหล่านี้เรียกว่า Binder ซึ่งในการใช้งานจะไม่ใช้ Binder เพียงอย่างเดียว แต่จะใช้วัสดุอื่นผสมด้วย เพื่อให้ได้แรงยึดเหนี่ยวที่ดีขึ้น แข็งแรงขึ้น และมีคุณสมบัติเหมาะสม กับงานนั้นๆ ส่วนผสมนี้เรียกว่า มอร์ต้าร์

เราจะเรียกมอร์ต้าร์ตามชนิดของ Binder ที่ผสมอยู่ เช่นหากใช้ดินเป็น Binder ส่วนผสมนั้นก็เรียกว่า Mud Mortar หรือ Clay Mortar หรือที่เรียกว่า สอดิน ซึ่งเรายังคงพบโบราณสถาน ที่อายุมากๆ บางแห่งที่ใช้สอดินในการเชื่อมอิฐให้ติดกัน ถ้าหากมอร์ต้าร์นั้น ผสมด้วย Plaster of Paris ก็เรียกว่า Gypsum Mortar [3]

1. เปือกดิน, สอดิน (Mud Mortar)

การใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีดินเป็นส่วนผสมหลัก มีชื่อเรียกในภาษาพื้นเมืองว่า "เปือกดิน" โดยพบในวิหารที่มีอายุ 200 ปีขึ้นไป ได้แก่ กลุ่มโบราณสถานในเวียงกุมกาม และพบที่วัดต้นเกว๋น การใช้สอดินนี้มีดินเหนียวเป็นเนื้อวัสดุหลักในการเชื่อมประสาน โดยมีการนำมาผสมกับทราย น้ำอ้อย และน้ำ กวนให้เข้ากันแล้วตำในครกให้เหลวพอเป็นเลนจึงนำมาใช้ได้

การใช้สอดินในการยึดอิฐแต่ละก้อนนั้นเข้าใจว่าจะต้องใช้ในปริมาณค่อนข้างมาก เพื่อให้เหนียวพอที่จะยึดอิฐแต่ละก้อนเข้าด้วยกัน ดังนั้นในโบราณสถานที่ใช้สอดินเป็นวัสดุในการเชื่อมประสานจึงพบชั้นของการสอที่มีความหนาค่อนข้างมาก

2. เปือกปูน, สอปูน (Gypsum Mortar)

การใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีปูนขาวเป็นส่วนผสมหลักหรือ "เปือกปูน" ในการก่อสร้างวิหารล้านนานั้น พบในวิหารล้านนาที่มีอายุ 200 ปีลงมา โดยมีส่วนผสมคือ ปูนขาวที่ผ่านการเตรียมและหมักแล้วหรือที่เรียกในภาษาช่างว่าปูนสุกผสมกับทราย และน้ำอ้อยกวนให้เข้ากัน ในอัตราส่วนปูนขาว 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน เปือกปูนนี้ให้ความแข็งแรงและทนทานกว่าเปือกดิน

นอกจากนี้ยังมีปูนอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันมากในอดีตนั่นคือ "ปูนตำ" ปูนตำเป็นชื่อเรียกปูนชนิดหนึ่งที่ผ่านกระบานการตำหรือโขลกมาแล้ว การตำหรือโขลกหรือการบดย้ำด้วยแรงกระแทกเพื่อให้วัตถุที่ผสมลงไปหรือส่วนประกอบปนกันหรือเข้ากันเป็นอย่างดี บางแห่งเรียกว่า ปูนทิ่ม ก็มีครั้นเมื่อนำไปปั้นก็เรียกว่า ปั้นปูนตำ ปั้นปูนโขลก และปั้นปูนทิ่มหรือบางแห่งเรียกว่าปูนสด เมื่อนำไปปั้นเรียกว่าปั้นปูนสด คือต้องปั้นกันสดๆ จะให้ปูนแห้งไม่ได้ต้องให้ปูนสดอยู่เสมอ ดังนั้นปูนตำจึงเรียกชื่อได้หลายชื่อ แต่ทั้งนี้ต้องผ่านการตำให้เข้ากันเป็นสำคัญ [6]

ส่วนผสมและสูตรปูนตำเมื่อครั้งอดีตนั้น ไม่มีหลักฐานทางเอกสารที่แน่ชัด ซึ่งมีความแตกต่างกันตามสภาพท้องถิ่นที่มีวัสดุหาได้ง่าย สิ่งแวดล้อมดินฟ้าอากาศ และความชำนาญของกลุ่มช่างที่ต่างกัน แต่อาจค้นคว้าได้จากชิ้นส่วนของปูนตำที่เหลืออยู่ เพื่อหาวัตถุที่ผสมกันและอัตราส่วนโดยวิธีการทดสอบทางวิทยาศาสตร์ และการเรียนรู้สืบทอดกันมาแต่อดีตกาล

จากการศึกษาค้นคว้าดูตัวอย่างข้อมูลปูนตำที่ใช้ก่อ ฉาบปั้นลาย ปั้นภาพทั่วประเทศ 282 แห่ง โดยวิธีสุ่มเก็บตัวอย่าง 18 แห่ง และจากการสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อเป็นตัวแทนแต่ละภาคออกมาได้ 8 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นภาคเหนือ 2 ตัวอย่าง ภาคอีสาน 2 ตัวอย่าง ภาคตะวันออก 1 ตัวอย่าง ภาคกลาง 2 ตัวอย่าง และ ภาคใต้ 1 ตัวอย่าง จากการศึกษาวัสดุที่ผสมในปูนตำด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ของคุณจิราภรณ์ อรัณยะนาค ผู้อำนวยการส่วนวิทยาศาสตร์เพื่อการอนุรักษ์ กรมศิลปากร พบว่าทั้ง 5 ภาคมีส่วนผสมของปูนแคลเซียม ทราย และเส้นใยเป็นส่วนที่ปรากฏอยู่ สำหรับกาวหรือตัวยึดในปูนนั้นไม่พบ จะพบเป็นคล้ายยางไม้กับพบน้ำมันเฉพาะภาคเหนือ 2

ตัวอย่างเท่านั้น แต่นักวิทยาศาสตร์ก็ยืนยันว่าการหากาวหรือตัวยึดไม่พบจากตัวอย่างภาคอื่นๆ จะเป็นเครื่องยืนยันว่าไม่มีกาวหรือตัวยึดในปูนตำเหล่านั้นไม่ได้ เพราะว่าจริงๆ อาจมีก็ได้ แต่ที่ไม่พบนั้นเพราะกาวสลายตัวไปหมดแล้ว เนื่องจากปูนตำที่ได้มาเป็นตัวอย่างนั้นมีอายุนานมากแล้วจึงกล่าวไม่ได้ว่าปูนตำนั้นไม่มีกาวหรือตัวยึดผสมมาแต่แรก

อาจารย์แนบ บังคม เคยกล่าวว่า "ปูนตำนั้นนับแต่โบราณเป็นต้นมาจะต้องมีส่วนผสม 4 อย่าง คือ ปูนขาว ทราย เส้นใยและกาวเสมอ อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง แต่ก็ไม่พ้นหลักใหญ่ๆ ทั้ง 4 อย่างนี้" ในเรื่องของสูตรหรือสัดส่วนปูนตำในอดีต อาจารย์แนบ บังคม เคยอธิบายไว้ว่า "สำหรับสูตรหรือสัดส่วนที่ผสมเป็นปูนตำมีต่างกัน แต่พอจะคิดเป็นอัตราเฉลี่ยมีสัดส่วนต่อกันโดยยึดเป็นสูตรกลางๆ ได้ดังนี้ ปูนขาวหมักน้ำแล้วผึ่งหมาดๆ 5 ส่วน ทรายละเอียดดีแล้ว 2 ส่วน เส้นใย 1 ส่วน กาวหรือตัวยึด 2 ส่วน แล้วนำมาตำให้เข้ากันจึงจะใช้ได้" [6]

2.1.3 วิธีการผสมปูนขาวและการหมักปูนขาวเพื่อใช้ในการก่อสร้าง

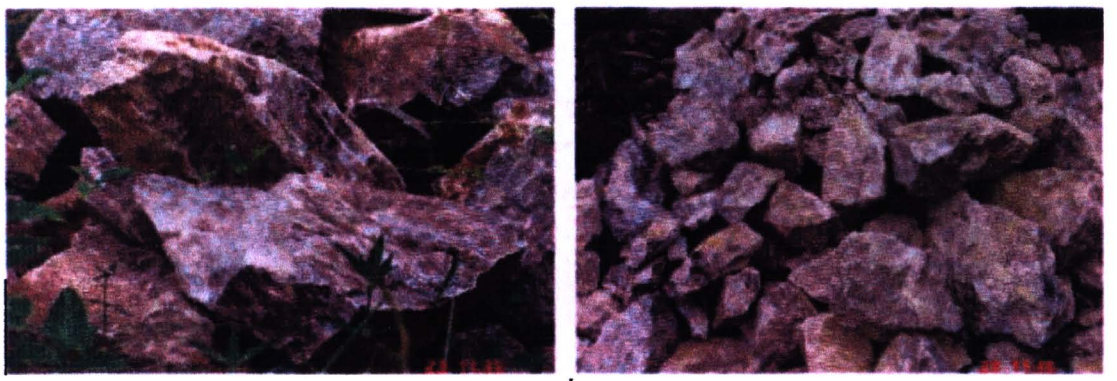
ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่และคงทน ปรากฏในการสร้างปราสาทสมัยโรมและกรีก นับเวลาได้เป็นพันปีมาแล้ว โดยนำปูนขาวมาใช้เพื่อการก่อยึดโครงอาคาร มีการเผาหินปูนด้วยวิธีต่างๆ นำพวกหินปูนขาว (Limestone) มีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคาร์บอร์เนต ($CaCO_3$)

จากการสัมภาษณ์ พระครูปลัดทรงสวัสดิ์ ปัญญาวชิโร เจ้าอาวาสวัดเมืองมาหลวง ถนนพระปกเกล้า อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ และคุณสมบูรณ์ ไชยคำ กำนันตำบลบ้านปง อำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ สามารถสรุปขั้นตอนและวิธีการทำปูนขาวแบบดั้งเดิมของเชียงใหม่ได้ดังนี้ [5]

ก. วัตถุดิบที่นำมาทำปูนขาว

1. หินปูนจากภูเขาที่ได้จากการเจาะระเบิด ซึ่งการเจาะระเบิดจะใช้วิธีการเจาะรูลงไปในหินปูนภูเขาที่ต้องการจะระเบิด หลังจากเจาะเสร็จก็จะใช้ดินปืนอันได้จากส่วนผสมของถ่านหินกับดินประสิวที่บดละเอียดลงไปในรูดังกล่าว อัดให้แน่นแล้วต่อสายชนวนออกจากรู จากนั้นนำดินเหนียวเข้าอุดส่วนบนของรูจนแน่น (จากปากรูจนถึงผิวดินปืนที่อัดแน่น) แล้วจึงจุดฉนวนให้ดินปืนทำงาน

2. เมื่อระเบิดเสร็จก็จะทำการขุดหินซึ่งจะได้หินปูนที่แตกออกเป็นก้อนขนาดคละกันไปดังรูป 2.1



รูป 2.1 หินปูนขนาดต่างๆ ที่ได้หลังจากการระเบิดหิน

ที่มา : ธานัท และคณะ [5]

3. นำหินปูนที่ได้มาผ่านกระบวนการทำปูนขาวต่อไป

3.1 นำหินปูนไปเรียงในเตาโดยชั้นแรกจะเรียงหินก้อนใหญ่ ชั้นต่อไปจะเรียงหินก้อนกลาง ส่วนชั้นบนสุดจะเป็นหินก้อนเล็ก

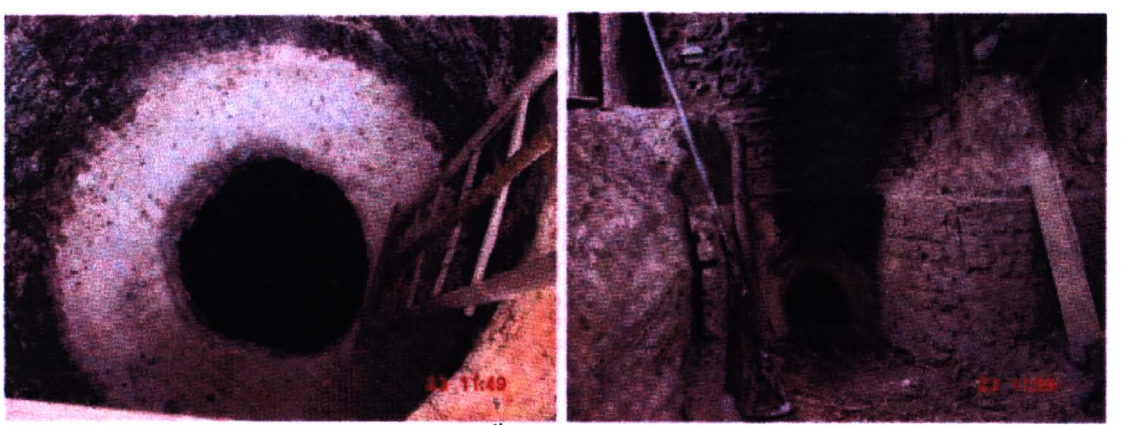
3.2 จากนั้นจึงเริ่มเผาหินปูน โดยจะใช้เวลาเผาประมาณ 24 – 36 ชั่วโมง เมื่อเผาเสร็จทิ้งไว้ให้เย็นลงซึ่งใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง

3.3 นำหินออกจากเตาแล้วเอาไปกอง บริเวณที่เตรียมไว้

3.4 จากนั้นใช้น้ำเย็นฉีดพรมลงไปในกองหินดังกล่าว หินเมื่อโดนน้ำจะแตกตัวสลายเป็นผงละเอียดและเกิดควันสีขาวขึ้น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาของความร้อน คาดว่าน่าจะอยู่ที่ประมาณ 80 – 90 องศาเซลเซียส แต่ไม่มีเปลวไฟ

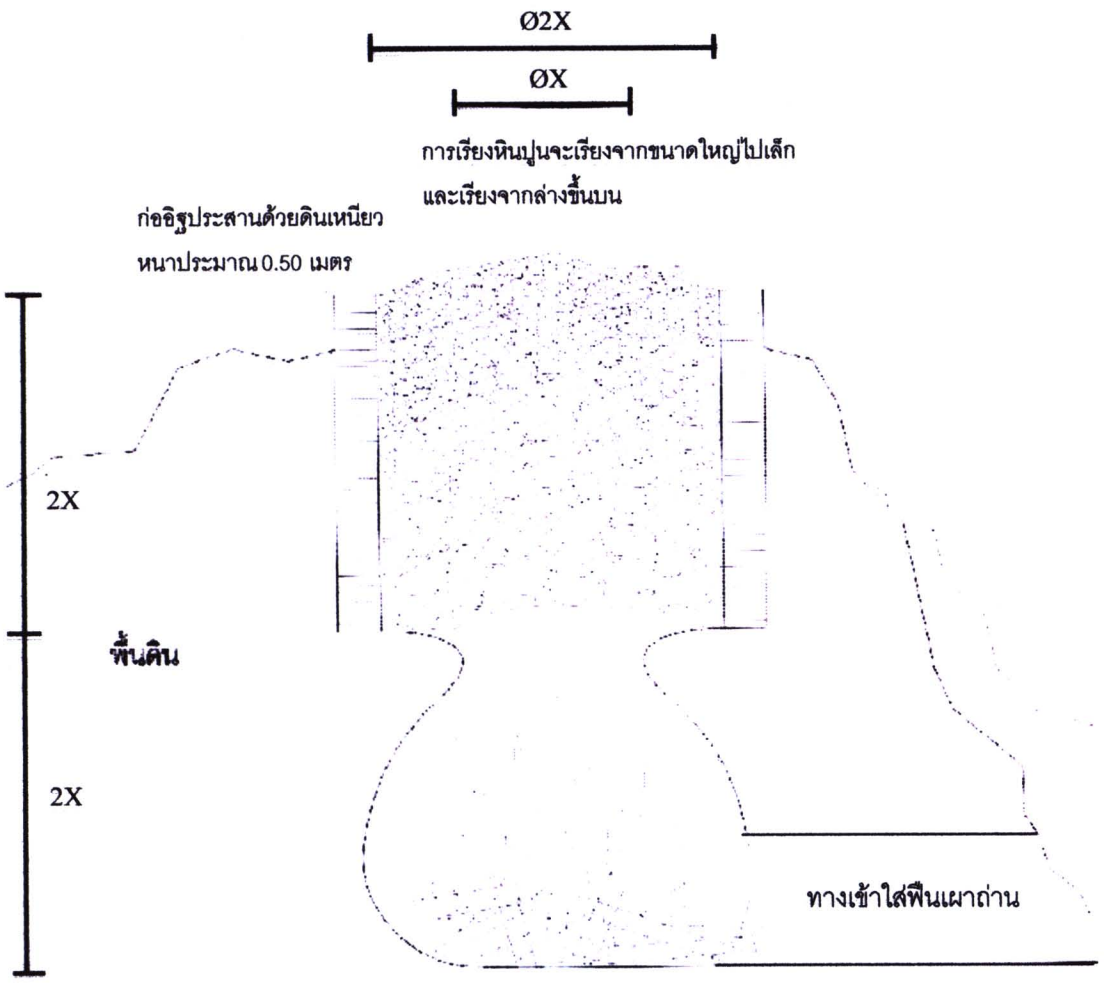
3.5 ทิ้งให้หินปูนที่แตกสลายเป็นผงปูนขาวเย็นตัวลงประมาณ 12 ชั่วโมงจึงใช้ได้

3.6 จากนั้นนำไปร่อนแล้วจึงบรรจุถุงหรือเก็บต่อไป



รูป 2.2 การเตรียมพื้นที่เตาเผาก่อนการเรียงหินปูน

ที่มา : ธานัท และคณะ [5]



รูป 2.3 การเรียงหินและรูปตัดเตาเผาปูนขาว

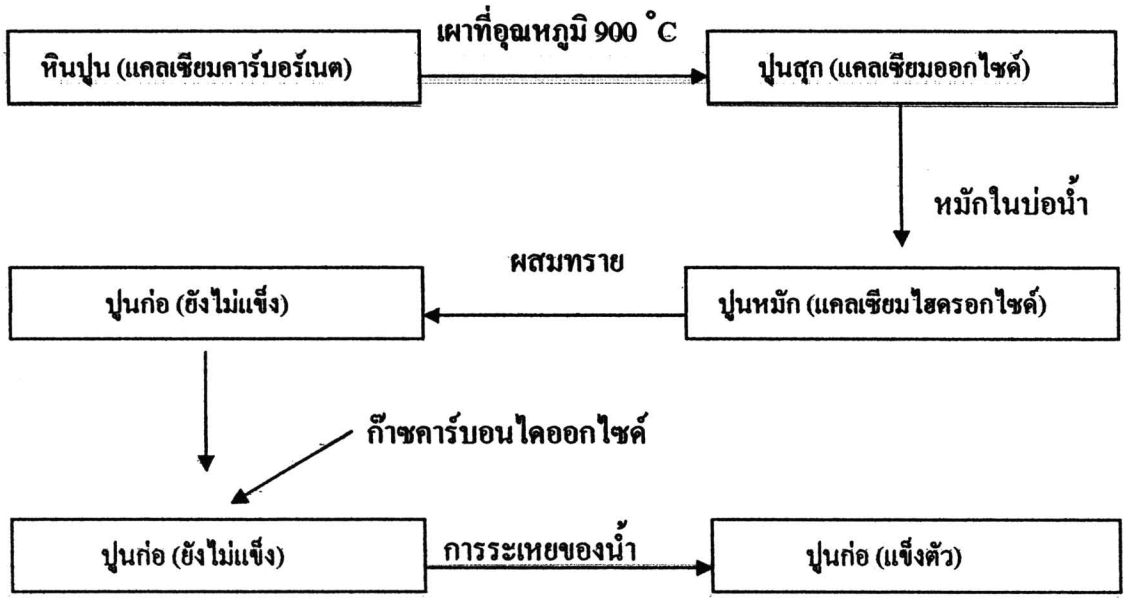
ที่มา : ธานัท และคณะ [5]

ข. การหมักปูนขาว

การหมักปูนขาวเพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้าง ในอดีตจะใช้วิธีการนำเอาหินปูนที่เผาและทิ้งให้เย็นแล้วนั้น ไปใส่ในหลุมดินที่ขุดเตรียมไว้ โดยหลุมดังกล่าวจะมีขนาดความกว้างและความลึกที่เหมาะสม เพียงพอต่อการรองรับบ่มปูนเพื่อที่จะใช้ในแต่ละงาน เมื่อใส่หินปูนเสร็จแล้วก็จะปิดปากหลุมด้วยแผ่นไม้ จากนั้นเอาดินกลบไว้ แล้วทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 6 – 12 เดือน เพื่อลดความเค็มของปูน และทำให้ปูนเหนียวขึ้น หินปูนที่อยู่ในหลุมนั้นเมื่อผ่านช่วงเวลาหมักจะถูกทำให้แตกสลายตัวจากน้ำและความชื้นในดิน ซึ่งเมื่อหมักจนได้เวลาที่กำหนดไว้ ก็นับว่ามีคุณภาพที่จะนำไปใช้ในการก่อสร้างได้ ปูนที่ได้เรียกว่า ปูนหมัก หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ในปัจจุบันการหมักบางแห่ง จะใช้วิธีการสร้างบ่อหมักขึ้นบนพื้นดินและบางแห่งก็จะขุดดินลงไปเป็นหลุม

เช่นเดิม แต่เมื่อใส่หินเผาลงไปในบ่อแล้วจะใช้วิธีการเติมน้ำในบ่อให้หินแตกสลายลง แล้วทิ้งไว้ประมาณ 3 – 7 วันจึงนำไปใช้ [5]

กระบวนการหมักปูนขาวดังที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เราสามารถสรุปกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.4 และสมการที่ 1 ดังนี้



รูป 2.4 แผนผังกระบวนการเปลี่ยนแปลงของปูนหมัก
ที่มา : ธานัท และคณะ [5]

$$CaCO_3 \xrightarrow{\Delta 900\ ^{\circ}C} CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$$

(Calcium Carbonate) (Calcium Oxide) (Calcium Hydroxide)

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longleftrightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2.1)$$

(Calcium Hydroxide) (Carbondioxide) (Calcium Carbonate)

2.2 กระบวนการเกิดสารละลายกรดกำมะถันในสภาพธรรมชาติ

ออกไซด์ของซัลเฟอร์เป็นสารประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดฝนกรด โดยซัลเฟอร์ที่พบในบรรยากาศอยู่ในรูปของสารประกอบ 3 ชนิด คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) ในรูปของละออง (Aerosol) เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 3 สารนี้ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีความสำคัญมากที่สุด เพราะนอกจากจะมีผลต่อสุขภาพของมนุษย์โดยตรงและสิ่งแวดล้อมแล้ว สาร SO_2 ยังสามารถเปลี่ยนเป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) ได้อีก ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ส่วนใหญ่มาจากแหล่งธรรมชาติ และแหล่งที่มาที่สำคัญมากที่สุดได้จากการเน่าเปื่อยของธรรมชาติ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ โดยจุลลินทรีย์แบบไร้อากาศ (Anaerobic Bacteria)

แหล่งเกิดของ SO_2 เป็นก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นกรด มีจุดเดือด -10 องศาเซลเซียส ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ SO_2 ในบรรยากาศมีที่มาสองแหล่งคือ จากการกระทำของมนุษย์และแหล่งตามธรรมชาติ SO_2 มีแหล่งที่มาจากการกระทำของมนุษย์สูงถึงประมาณ 1/3 ของที่มาจากธรรมชาติ แหล่งจากการกระทำของมนุษย์ที่สำคัญที่สุด ได้แก่ การเผาเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน และน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากเชื้อเพลิงเหล่านี้มีสารประกอบซัลเฟอร์ (S) ปะปนอยู่ด้วย ถ่านหินจากบางแหล่งมี S สูงถึงร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่วนน้ำมันปิโตรเลียมมีประมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ฉะนั้นเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ S จะถูกออกซิไดซ์เป็น SO_2 ซึ่งเขียนแสดงด้วยสมการทั่วไปดังนี้ [16]

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 \qquad (2.2)$$

นอกจากนี้อุตสาหกรรมบางชนิด เช่นอุตสาหกรรมการถลุงตะกั่วและสังกะสี ซึ่งสินแร่ที่สำคัญของตะกั่ว ได้แก่ Galena ซึ่งมี PbS เป็นองค์ประกอบสำคัญ ส่วนสังกะสีอยู่ในรูป ZnS การถลุงแร่นี้จึงมีส่วนปล่อย SO_2 สู่บรรยากาศด้วย ปริมาณของ SO_2 จากแหล่งต่างๆ (รวมทั้งจากแหล่งธรรมชาติ) สรุปในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 แหล่งกำเนิดของก๊าซมลพิษของกำมะถัน

ที่มา : Robinson and Robbins [30]

แหล่งกำเนิด	ประมาณ (10^6 เมตริกตันต่อปี)
การเผาถ่านหิน	46
การเผาน้ำมันปิโตรเลียมและการกลั่นน้ำมัน	13
การถลุงทองแดง	6
การถลุงตะกั่วและสังกะสี	1.3
รวมแหล่งจากการกระทำของมนุษย์	**66**
H_2S จากดิน โดยกระบวนการชีววิทยา	62
H_2S จากแหล่งทะเล โดยกระบวนการชีววิทยา	27
SO_4^{2-}	40
รวมแหล่งจากธรรมชาติ	**129**
ปริมาณสุทธิ	195

ก๊าซ SO_2 ที่ได้จากแหล่งธรรมชาติเกิดจากการออกซิเดชั่นของ H_2S โดย O, O_2 หรือ O_3 ดังนี้

$$H_2S + O \xrightarrow{O_2} HS + HO \longrightarrow SO_2 + H_2O \qquad (2.3)$$

$$H_2S + 3/2O_2 \longrightarrow SO_2 + H_2O \qquad (2.4)$$

$$H_2S + O_3 + P \longrightarrow SO_2 + H_2O + P \qquad (2.5)$$

P ในสมการ (2.4) อาจเป็นอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยในอากาศ เช่น ฝุ่นละอองหรือละอองน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวคะตะไลส์

เมื่ออากาศชื้นมาก SO_2 อาจรวมกับ H_2O เกิดเป็นกรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) ซึ่งสามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ได้ไม่ยากนักถ้ามีฝุ่นละอองซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวคะตะไลซ์อยู่ด้วย ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของการขจัด SO_2 ออกจากบรรยากาศ เช่นกัน

$$SO_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_3 \qquad (2.6)$$

$$H_2SO_3 + 1/2O_2 \xrightarrow{\text{Particulate}} H_2SO_4 \quad (2.7)$$

กรดกำมะถัน (H_2SO_4) ที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียหรือเกลือของโลหะ เช่น NaCl เกิดเป็นซัลเฟต (SO_4^{2-})

$$H_2SO_4 + 2NH_3 \longrightarrow (NH_4)_2SO_4 \quad (2.8)$$

$$H_2SO_4 + 2NaCl \longrightarrow Na_2SO_4 + 2HCl \quad (2.9)$$

นอกจากนี้แล้ว SO_2 เองก็สามารถเกิดเป็น SO_4^{2-} อย่างรวดเร็ว โดยทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียในอากาศชื้น ดังนี้

$$SO_2 + 2NH_3 + H_2O + 1/2O_2 \longrightarrow (NH_4)_2SO_4 \quad (2.10)$$

และในที่สุดกรดกำมะถัน ซัลเฟต และ HCl ที่เกิดขึ้น จะลงมาสู่ผิวดินพร้อมกับน้ำเป็นเหตุให้น้ำฝนมีค่า pH ต่ำกว่า 7 ซึ่งก็คือ ฝนกรด (Acid Rain) ซึ่งโดยทั่วไปมีช่วง pH 5.6 – 2.1 ขึ้นอยู่กับปริมาณสารพิษ SO_2 และคุณสมบัติอื่นๆ ในอากาศ

สัญญา [13] ได้สรุปความเป็นกรดของน้ำฝนไว้ว่า น้ำฝนในธรรมชาติมีความเป็นกรดเล็กน้อย เนื่องจากการรวมตัวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีอยู่ในธรรมชาติเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งทำให้ค่า pH ของน้ำฝนมีค่าอยู่ประมาณ 5.6 ถ้าค่า pH ของน้ำฝนต่ำกว่า 5.6 จะถือว่าเป็นฝนกรด หากมีก๊าซอื่นปนอยู่ในบรรยากาศ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จะทำให้ค่า pH ของน้ำฝนต่ำลงไปกว่าค่าปรกติ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ให้กลายเป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) โดยที่ประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของฝนกรดเป็นกรดกำมะถัน และอีกร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเป็นกรดไนตริก จากการสำรวจค่า pH ในกรุงเทพมีค่าอยู่ในช่วง 4.81 – 9.20 ที่กาญจนบุรีและสกลนครอยู่ในช่วง 4.15 – 6.88 ในอำเภอหาดใหญ่อยู่ในช่วง 4.71 – 6.80 ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีอยู่ในช่วง 4.60 – 5.10 และจากการศึกษาและวิจัยฝนกรดในจังหวัดเชียงใหม่ [16] พบว่าค่า pH ของน้ำฝนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 5.60 – 6.90 และ pH ต่ำสุดที่วัดได้เท่ากับ 4.80

2.3 การผุกร่อนและการกัดกร่อนของโบราณสถานและโบราณวัตถุ

โบราณสถานและโบราณวัตถุต่างๆ ประกอบไปด้วยวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างกัน และมีกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกันออกไป ในทางวิทยาศาสตร์สามารถแบ่งวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของโบราณวัตถุออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ อินทรียวัตถุ และอนินทรียวัตถุ [10]

ก. อินทรียวัตถุ หมายถึงวัสดุที่ได้มาจากสิ่งที่มีชีวิต หรือเป็นผลิตผลที่ได้จากสิ่งที่มีชีวิต ดังนั้นองค์ประกอบหลักของโบราณวัตถุประเภทนี้ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน นอกจากนี้อินทรียวัตถุยังแบ่งออกเป็น

1. อินทรียวัตถุที่ได้จากพืช ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าลินิน ผ้าป่าน ปอ ไม้ กระดาษ ใบลาน เครื่องจักสาน ยางไม้ สีย้อม ฯลฯ วัตถุประเภทนี้จะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ

2. อินทรียวัตถุที่ได้จากสัตว์ ได้แก่ ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ หนังสัตว์กระดูก งา เขา ผม ขน ฯลฯ วัตถุประเภทนี้จะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ

3. อินทรียวัตถุที่ได้จากการสังเคราะห์ ได้แก่ พลาสติกชนิดต่างๆ ยางสังเคราะห์ ฟิล์มถ่ายรูป ฟิล์มภาพยนตร์ แผ่นเสียง ผ้าใยสังเคราะห์ ฯลฯ

ข. อนินทรียวัตถุ หมายถึงวัตถุที่ทำมาจากสิ่งไม่มีชีวิต ได้แก่ หิน ดิน แร่ต่างๆ โลหะ ฯลฯ ตัวอย่างเช่น เหล็กที่ได้มาจากการถลุงแร่เหล็ก เครื่องปั้นดินเผาที่ทำมาจากดินเหนียว แก้วที่ทำจากทราย ปูนปั้นที่ทำจากปูนขาว เป็นต้น ซึ่งอนินทรียวัตถุยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ดังนี้

1. โลหะ ที่สำคัญได้แก่ ทองคำ เงิน ของคำขาว เหล็ก ตะกั่ว ทองแดง ดีบุก สังกะสี ฯลฯ และโลหะผสมต่างๆ เช่น สำริด(โลหะผสมทองแดงกับดีบุก) ทองเหลือง(โลหะผสมทองแดงกับสังกะสี) ชิน(โลหะผสมของตะกั่วกับดีบุก) เป็นต้น

2. อโลหะ ที่สำคัญได้แก่ หิน อิฐ เครื่องปั้นดินเผา ปูนปั้น เครื่องเคลือบ และแก้ว เป็นต้น

ดังนั้นเมื่อวัสดุเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยา ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ด้วยกัน เช่น ความเข้มข้นของคุณสมบัติ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความชื้นสัมพันธ์ ค่าความเป็นกรดด่างและคุณสมบัติของวัสดุเอง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุชำรุดทรุดโทรมเสื่อมสภาพ

2.3.1 สาเหตุของการกัดกร่อน

สาเหตุที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการชำรุดทรุดโทรมเสื่อมสภาพ สามารถแบ่งได้เป็นหลายสาเหตุและหลายกระบวนการ ซึ่งจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน และมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน จนบางครั้งไม่สามารถแยกออกจากกันโดยเด็ดขาด ทั้งนี้อาจมาจากสิ่งแวดล้อม จุดอ่อนในตัววัตถุเอง หรือจากการกระทำของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งสาเหตุจากสิ่งแวดล้อมนั้นมีบทบาทสำคัญมากที่สุดต่อการชำรุดเสื่อมสภาพของโบราณสถานและโบราณวัตถุ เนื่องจากปัจจัยที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้หรือป้องกันยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งโบราณสถานและโบราณวัตถุที่อยู่กลางแจ้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ความชื้น ความร้อน แสงสว่าง ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ ฝุ่นละออง เกลือ พืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ล้วนมีบทบาทสำคัญที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลง [10]

หากพิจารณากระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพของโบราณสถานและโบราณวัตถุ โดยอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์นั้น จะสามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพนี้ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเชิงกล ทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีววิทยาของโบราณวัตถุ โดยมีสาเหตุต่างๆ มากมาย เพื่อความสะดวกในการดูแลรักษาโบราณสถานและโบราณวัตถุ จะแบ่งองค์ประกอบที่เป็นสาเหตุทำให้ศิลปะโบราณวัตถุเหล่านี้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

ก. เกิดจากสิ่งแวดล้อม

โบราณสถานและโบราณวัตถุส่วนใหญ่สร้างอยู่กลางแจ้ง ซึ่งสิ่งแวดล้อมรอบๆ ล้วนสามารถสร้างกระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพให้แก่ศิลปะโบราณวัตถุได้ทั้งสิ้น ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมอาจเกิดได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม และเกิดขึ้นตลอดเวลานับตั้งแต่เริ่มมีการก่อสร้าง ซึ่งมีอัตราการกัดกร่อนที่ไม่แน่นอนและไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศของสถานที่นั้นๆ

1. น้ำฝนและความชื้น

น้ำฝนและความชื้นมีบทบาทสำคัญและก่อให้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพได้รุนแรงที่สุด โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับวัตถุโดยตรงหรือช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น โดยอาจไปละลายองค์ประกอบบางส่วนของโบราณสถานและโบราณวัตถุหรืออาจรวมกับดิน ฝุ่นละออง ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ รวมทั้งวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของโบราณสถานและโบราณวัตถุเอง แล้วกลายเป็นสารละลายกรด ด่างหรือเกลือ ซึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับโบราณสถานและโบราณวัตถุแล้วก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากมาย ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดที่สุดคือ การเป็นสนิมและการสึกกร่อนของโลหะชนิดต่างๆ การสึกกร่อนของหิน อิฐ ปูน ฯลฯ

2. อุณหภูมิ

อุณหภูมิยังมีผลต่อการเสื่อมสภาพลักษณะอื่นๆ อีก เช่น อุณหภูมิสูงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีความชื้นเข้าร่วมด้วย ปฏิกิริยาจะยิ่งทวีความรุนแรง แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเลต และรังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ทำอันตรายต่อวัตถุแทบทุกชนิด พลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้จะทำให้โมเลกุลของอินทรีวัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีขั้นตอนที่สลับซับซ้อน ผลสุดท้ายจะทำให้โมเลกุลแตกหัก อินทรียวัตถุมักมีสภาพกรอบเปราะ ขาดความเหนียว ขาดความยืดหยุ่น มีสีซีดจาง การเสื่อมสภาพในลักษณะเช่นนี้ค่อนข้างรุนแรงและยากต่อการอนุรักษ์

3. ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ

ก๊าซหลายชนิดในบรรยากาศ มีบทบาทต่อการชำรุดเสื่อมสภาพของวัตถุหลายชนิด เช่น ก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ทำให้โลหะเป็นสนิม ก๊าซโอโซนเป็นตัวเติมออกซิเจนที่รุนแรงสามารถทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลของอินทรียวัตถุหลายชนิดแตกหักออก โดยการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด คือ ทำให้ผ้า กระดาษ และภาพเขียน อ่อนนุ่มฉีกขาดง่าย และมีสีซีดจาง ในบริเวณที่มีโรงงานอุตสาหกรรมหรือมีการจราจรที่คับคั่ง จะพบได้ว่าในบรรยากาศบริเวณนั้นจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ปะปนอยู่ด้วยปริมาณสูงกว่าปกติ ก๊าซเหล่านี้จะรวมตัวกับน้ำหรือไอน้ำแล้วได้กรด ซึ่งสามารถกัดกร่อนเนื้อวัตถุทุกชนิด ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับโลหะ และเกลือของโลหะหลายชนิดทำให้โลหะหมองคล้ำเป็นสนิม เกลือของโลหะบางชนิดใช้เป็นรงควัตถุ (วัตถุให้สี) เมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเปลี่ยนสี เช่น สีขาวมาจากตะกั่วคาร์บอเนตมักเปลี่ยนเป็นสีดำ เป็นต้น

4. ฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองและอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศก็ก่อให้เกิดความเสื่อมสภาพได้หลายรูปแบบ ในที่ที่มีลมแรงฝุ่นละอองที่ปลิวมากับลมอาจแข็งพอที่จะขัดสีผิวของวัตถุให้สึกกร่อนลงไปเรื่อยๆ ในบริเวณที่ลมสงบฝุ่นละอองจะสะสมพอกพูนอยู่บนวัตถุ ทำให้เกิดคราบสกปรกในบริเวณที่มีความชื้นสูงหรือเปียกชื้น ฝุ่นละอองเหล่านี้จะรวมตัวกับน้ำหรือไอน้ำแล้วกลายเป็นสารละลายของกรด ด่าง หรือเกลือ ซึ่งทำปฏิกิริยาเคมีกับวัตถุได้หลายรูปแบบ ฝุ่นละอองบางประเภท เช่น เขม่าและควัน ซึ่งมีลักษณะเป็นวัตถุเหนียวๆ ติดอยู่บนผิวของวัตถุ ทำให้แลดูสกปรก ทำความสะอาดยาก และยังเป็นแหล่งสะสมฝุ่นละอองประเภทอื่นๆ รวมทั้งสปอร์ต่างๆ ให้มาเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของวัตถุมากขึ้นเรื่อยๆ ฝุ่นละอองบางประเภทดูดความชื้นได้ดี จึงทำให้ผิวของวัตถุชื้นขึ้น และทำให้น้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับวัตถุได้มากขึ้น

5. เกลือ

ในสิ่งแวดล้อมมีเกลือปะปนอยู่มากมายหลายชนิด เช่น พื้นที่ที่อยู่ใกล้ทะเลจะมีเกลือแกงปะปนอยู่ในบรรยากาศมาก ทำนองเดียวกันในพื้นที่ที่ตั้งอยู่บนแหล่งเกลือสินเธาว์ก็จะมีเกลือแกงปะปนอยู่ในดิน ในน้ำใต้ดิน และแหล่งน้ำต่างๆ มาก เกลือเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับโบราณสถานและโบราณวัตถุได้อย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นหากมีความชื้นร่วมด้วย เกลือส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้ดีกลายเป็นสารละลายของเกลือซึ่งจะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุที่มีรูพรุน เช่น หิน เครื่องปั้นดินเผา เครื่องเคลือบอิฐ ปูนปั้น ฯลฯ แล้วสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุ เมื่อใดที่มีความชื้นลดลง น้ำจะระเหยออกไปตรงผิวของวัตถุ ส่วนเกลือจะตกผลึกอยู่ภายในเนื้อวัสดุนั้นๆ จากการสำรวจและวิเคราะห์ชนิดของเกลือพบว่า เกลือส่วนใหญ่เป็นเกลือแกง (NaCl) ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ทีนาไดต์ (Na_2SO_4) มิราบิไลต์ ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) แคลไซต์ ($CaCO_3$) เอปโซไมต์ ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) ฯลฯ

6. แสงสว่าง

เป็นสาเหตุให้ศิลปะโบราณวัตถุที่ทำจากอินทรียวัตถุชำรุดเสื่อมสภาพ วัตถุที่ได้รับแสงเป็นเวลานานๆ จะสีซีดจาง หรือมีสีเปลี่ยนไปจากเดิม เนื้อวัตถุมักกรอบ เปราะ ขาดความเหนียว ขาดความแข็งแรง ฉีกขาดง่าย ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ ภาพเขียนและผ้าโบราณ ส่วนที่ได้รับแสงสว่างมักมีสีซีดจางลงหรือมีสีเปลี่ยนไปจากเดิม เส้นใยเปื่อยกรอบฉีกขาด การชำรุดเสื่อมสภาพเช่นนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างถาวร ไม่สามารถซ่อมแซมหรือแก้ไขให้กลับสู่สภาพเดิมได้ นอกจากนี้ยังพบว่าผิวของโบราณสถานและโบราณวัตถุที่หันหน้าสู่ทิศตะวันออกและทิศตะวันตกผุเปื่อยมากกว่าด้านที่หันหน้าสู่ทิศเหนือและทิศใต้ เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจากแสงอาทิตย์และแรงลม ทำให้บริเวณดังกล่าวมีอัตราระเหยของน้ำสูงกว่าบริเวณอื่นๆ

7. พืช

พืชก็มีบทบาทไม่น้อยในการทำให้โบราณสถานชำรุดเสื่อมสภาพ มักพบพืชหลายชนิดเจริญเติบโตอยู่บนโบราณสถานที่สำคัญได้แก่ หญ้าชนิดต่างๆ ต้นไผ่ ต้นโพธิ์ ต้นไทร สาบเสือ ตีนตุ๊กแก ผักปราบ น้ำนมราชสีห์ บานไม่รู้โรย ป่าพังพวย ฯลฯ รากพืชเหล่านี้จะชอนไชไปในช่องว่าง รูพรุน รอยแตกรอยต่อระหว่างวัสดุก่อสร้าง แล้วดันให้วัสดุก่อสร้างแยกหรือแตกออกจากกัน ยิ่งเวลาผ่านไปนานๆ รากเหล่านี้จะขยาย ตัวขึ้นเรื่อยๆ และมีแรงดันเพิ่มขึ้น จนในที่สุดอาจทำให้บางส่วนของโบราณสถานแตกกะเทาะหรือพังทลายลงมา บางครั้งพบว่ารากของพืชทำให้โบราณสถานเอนเอียงไปสร้างปัญหาในการอนุรักษ์เป็นอย่างมาก นอกจากพืชที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีพืชชั้นต่ำอีกจำนวนมากอยู่บนโบราณสถานและโบราณวัตถุที่อยู่กลางแจ้งหรืออยู่ในที่ชื้นแฉะ ส่วนมากพบอยู่บนโบราณสถานโบราณวัตถุที่ติดกับดินและส่วนที่น้ำใต้ดินซึมขึ้นไปถึงพืชชั้นต่ำ

ที่พบมาก ได้แก่ มอส เฟิร์นก้านคำและเฟิร์นชนิดอื่นๆ พืชเหล่านี้มีอายุไม่ยืนยาวเมื่อตายไป ซากของพืชเหล่านี้จะกลาย เป็นฮิวมัสซึ่งเป็นแหล่งอาหารของพืชอื่นๆ ที่จะเจริญเติบโตต่อไป

ข. เกิดจากจุดอ่อนในตัววัตถุเอง

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โบราณสถานและโบราณวัตถุประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด วัสดุแต่ละชนิดก็มีความสามารถในการดูดและคายความชื้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุแต่ละชนิด ระดับความชื้นจึงมีผลอย่างมากต่อการ "คงสภาพ" หรือ "เสื่อมสภาพ" ของวัตถุ เช่น อินทรียวัตถุมีความสามารถในการดูดและคายความชื้นได้ดี หากเก็บรักษาในที่ที่มีความชื้นสูงเกินไป วัตถุจะดูดความชื้นจากบรรยากาศแล้วขยายตัวหรือบวมพองตัวขึ้น ในขณะเดียวกันระดับความชื้นที่สูงเกินไปจะทำให้วัตถุอ่อนนุ่ม ขาดความเหนียว ฉีกขาดหรือแตกหักง่าย และยังเป็นแหล่งอาหารหรือที่อยู่อาศัยของแมลงและจุลินทรีย์อีกด้วย ความชื้นที่แปรเปลี่ยนขึ้นๆ ลงๆ ตลอดเวลา ทำให้วัตถุหลายชนิดมีการหดตัวและขยายตัวสลับกันไปเรื่อยๆ นานๆ เข้าวัตถุจะเกิดการแตกร้าว โก่งงอ บิดเบี้ยว หรือกะเทาะแยกหลุดออกจากกันได้

บางทีการชำรุดเสื่อมสภาพอาจเริ่มตั้งแต่อยู่ในระหว่างขั้นตอนการผลิตหรือในระหว่างการใช้งาน อัตราการเสื่อมสภาพจะสูงขึ้นมากเมื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม หรือเก็บรักษาและจัดแสดงด้วยวิธีที่ไม่เหมาะสม

ค. เกิดจากการกระทำของมนุษย์และสัตว์

1. มนุษย์

มนุษย์เป็นสาเหตุทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุชำรุดทรุดโทรมโดยไม่รู้ตัว โดยเกิดจากการสั่นสะเทือนของยานพาหนะ เครื่องจักร เครื่องยนต์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้าง การระเบิด ฯลฯ ซึ่งล้วนแต่มีผลกระทบต่อโบราณสถานและโบราณวัตถุที่อยู่ใกล้เคียงทั้งสิ้น ความสั่นสะเทือนทำให้แรงยึดเหนี่ยวของวัสดุต่างๆ ลดน้อยลงหรือทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกจากที่เดิมทีละน้อย นานๆ เข้าจะทำให้เกิดการชำรุดแตกหักพังทลายได้

2. แมลง

แมลงเป็นสาเหตุให้ศิลปะโบราณวัตถุที่ทำจากอินทรียวัตถุชำรุดเสื่อมสภาพไปอย่างน่าเสียดาย เนื่องจากแมลงส่วนใหญ่ใช้ปากกัดกินทำลายศิลปวัตถุ ทำให้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพอย่างถาวร แมลงที่พบมากเช่น ปลวก แมลงสาบ ไร แมลงสามง่าม และมอด เป็นต้น

3. จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญเป็นสาเหตุให้ศิลปวัตถุชำรุดเสื่อมสภาพได้แก่ รา สาหร่าย แบคทีเรีย สำหรับศิลปะโบราณวัตถุที่เก็บรักษาในที่ร่มนั้นมักพบราขึ้นเจริญเสมอในช่วงที่มีความชื้นสูง ระหว่างเดือนสิงหาคม – ตุลาคม ของทุกปี ส่วนสาหร่ายและแบคทีเรียจะพบมากกรณีที่ศิลปะโบราณวัตถุอยู่กลางแจ้ง หรืออยู่ในที่น้ำท่วมถึงหรือมีฝนสาดหรือเปียกชื้นอยู่เสมอ นอกจากนั้นโบราณสถานและโบราณวัตถุที่อยู่กลางแจ้งยับพบสาหร่ายและไลเคน ซึ่งนอกจากจะทำให้เกิดคราบเปื้อนด่างดวงสีต่างๆ แล้วยังสร้างกรดอินทรีย์หลายชนิดออกมากัดกร่อนเนื้อวัสดุได้อีกด้วย

4. สัตว์อื่นๆ

ได้แก่ นก หนู ค้างคาว วัว ควาย ฯลฯ ต่างก็มีบทบาทในการทำลายศิลปะโบราณวัตถุทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม หากเป็นหนู เนื้อของศิลปวัตถุจะถูกกัดกินเป็นอาหาร เกิดเป็นช่องโหว่หรือรูพรุน ส่วนนกก็ทำความเสียหายเช่นกัน โดยพบว่ามูลของนกพิราบบนเทวรูปทำให้เกิดเกลืออเซเลทในเนื้อหิน ส่วนวัว ควาย มักพบเสมอบนโบราณสถานในชนบท วัวควายเหล่านี้มักปีนป่ายโบราณสถาน ทำให้บางส่วนของโบราณสถานพังทลายหรือแตกกะเทาะ

2.3.2 การกัดกร่อนและปฏิกิริยาการกัดกร่อน

จากการตรวจสอบด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์ พบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ข้างต้นนั้นเกิดจากเกลือและความชื้น เกลือที่สร้างปัญหามากคือเกลือที่ละลายน้ำได้ (Soluble Salts) เกลือเหล่านี้ไวต่อปฏิกิริยาหรือพร้อมที่จะทำปฏิกิริยาอยู่ตลอดเวลา หากมีน้ำหรือความชื้นร่วมอยู่ด้วยปฏิกิริยาจะเกิดเร็วยิ่งขึ้น โดยเกลือเป็นสารเคมีที่พบมากทั่วไปในธรรมชาติทั้งในดิน ในน้ำ ในอากาศ ในวัสดุต่างๆ และในร่างกายของสิ่งมีชีวิต เกลือมาอยู่บนโบราณสถานได้หลายทางดังนี้ [2]

1. เกลือที่เป็นองค์ประกอบของดิน

ในดินมีเกลือและแร่ธาตุต่างๆ มากมาย เพราะดินเกิดจากการพังทลายของหินชนิดต่างๆ องค์ประกอบส่วนใหญ่ของดินจึงเป็นทรายและดินเหนียว สารอินทรีย์ที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของสิ่งมีชีวิตซึ่งเรียกว่า ฮิวมัส น้ำ และจุลินทรีย์ เป็นต้น ดินที่มีสารอินทรีย์อยู่มากมีแนวโน้มที่จะเป็นกรดได้ง่าย กรดที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของดินและที่มีอยู่ในดิน เกิดเป็นเกลือชนิดต่างๆ อีกมากมาย เมื่อเกลือทำปฏิกิริยากับน้ำจะแตกตัวเป็นไอออน และทำให้สารละลายของเกลือมีฤทธิ์เป็นกรดหรือเป็นด่าง หรือเป็นกลางซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อไปอีกเรื่อยๆ เพราะฉะนั้น ในดินจึงมีเกลือชนิดต่างๆ อยู่มากมายทั้งเกลืออินทรีย์และเกลืออนินทรีย์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2. เกลือจากน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินมักมีเกลือหลายชนิดที่ละลายน้ำได้ปะปนอยู่ด้วยหลายชนิดเพราะเป็นตัวทำละลายที่ดี น้ำฝนและน้ำบนดินจะไหลและซึมลงไปในดิน ผ่านชั้นดินและกรวด ทรายที่มีรูพรุน ทำให้ได้น้ำสะอาดขังอยู่ใต้ดิน ในขณะเดียวกันน้ำที่ไหลซึมลงไปในดินนั้น ก็จะละลายเกลือต่างๆ ออกมาด้วย น้ำใต้ดินจึงมีเกลือต่างๆ ปนอยู่เสมอ เกลือที่มักพบในน้ำใต้ดินได้แก่ แคลเซียมไบคาร์บอเนต ($Ca(HCO_3)_2$) แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($Mg(HCO_3)_2$) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) เป็นต้น พื้นที่ที่อยู่ใกล้ทะเลและแหล่งเกลือสินเธาว์มักมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และโซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) ปะปนอยู่มากกว่าพื้นที่ที่อยู่ห่างทะเล

3. เกลือที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุก่อสร้าง

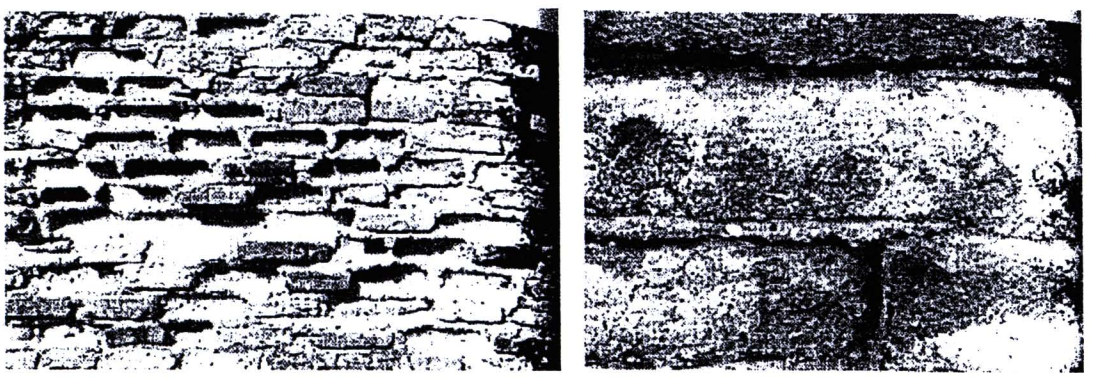
วัสดุก่อสร้างแทบทุกชนิดที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน เช่น หิน อิฐ ศิลาแลง ดินเหนียว ทราย ปูนขาว และปูนซีเมนต์ เป็นต้น ล้วนมีเกลือปะปนอยู่ด้วยมากมาย ทั้งที่ปะปนมาแต่เดิมจากแหล่งวัตถุดิบและที่เกิดจากการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติของวัสดุก่อสร้าง อิฐที่ทำจากดินเหนียวและปูนก่อที่ทำจากปูนขาว มักมีเกลือแคลเซียมซัลเฟตในรูปของยิปซัมปะปนอยู่ด้วยเสมอ โบราณสถานร้างบางแห่งสร้างด้วยอิฐและสอด้วยดินเหนียว โดยมีแกนในของโบราณสถานทำด้วยดินเหนียว เช่น เจดีย์อิฐก่อสมัยสุโขทัยและอยุธยา ทรายและกรวดที่นำมาผสมปูนก็มีเกลือปะปนอยู่หลายชนิดเช่นกัน ขึ้นอยู่กับที่มาของทรายและกรวดนั้นๆ

4. เกลือที่มาจากสิ่งแวดล้อม

ในสิ่งแวดล้อมรอบๆ โบราณสถาน มีเกลือปะปนอยู่หลายชนิด เช่น ในดินนอกจากจะมีเกลือที่เป็นองค์ประกอบของดินเองแล้ว ยังมีเกลืออื่นๆ จากกระบวนการเมตาโบลิซึมของสิ่งมีชีวิต ของเสียที่สิ่งมีชีวิตขับถ่ายออกมา การเน่าเปื่อยผุพังของสิ่งมีชีวิต เกลือที่เกิดจากการใช้ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าเชื้อรา ยาฆ่าวัชพืช ปุ๋ยวิทยาศาสตร์และปุ๋ยอินทรีย์ สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพของดิน เช่น การใช้เกลือจืด (ยิปซัม) แก้ดินเปรี้ยว เป็นต้น แม้แต่ในเขม่าและควันก็มีเกลือหลายชนิดปะปนอยู่ เช่น โพแทสเซียมคลอไรด์ แอมโมเนียมคลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมฟอสเฟต และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น เขม่าที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท นอกจากจะมีเกลือแล้วอาจมีกรดปนอยู่ด้วย

เกลือที่พบมากบนโบราณสถาน ได้แก่ Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), Halite (NaCl), Thenardite (Na_2SO_4), Calcite ($CaCO_3$) และ Mirabillite ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$)

เกลือที่พบบ้างเล็กน้อยบนโบราณสถาน ได้แก่ Hexahydrite ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$), Epsomit ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), Darapskite ($Na_3(NO_3)SO_4 \cdot H_2O$), Sodanitre ($NaNO_3$) และ Bloedite ($Na_2Mg(SO_4 \cdot 4H_2O)$)



(ก) สภาพการผุกร่อนของอิฐบนโบราณสถาน (ข) ผลึกเกลือบนผิวอิฐ

รูป 2.5 ลักษณะการเสื่อมสภาพของอิฐบนโบราณสถาน

ที่มา : จิราภรณ์ [2]

ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของอินทรียวัตถุซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นเกลือฟอสเฟต เช่น แคลเซียมฟอสเฟต และโพแทสเซียมฟอสเฟต เป็นต้น นอกจากนี้เกลือฟอสเฟตยังอาจมาจากปุ๋ย ผงซักฟอก และโรงงานอุตสาหกรรม ในปัสสาวะของคนและของสัตว์มีองค์ประกอบที่สำคัญเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ มีชื่อเฉพาะว่า คาร์บาไมด์ เมื่อสลายตัวจะให้แอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นๆ ในสิ่งแวดล้อมแล้วได้เกลือหลายชนิด เช่น เกลือไนเตรต ไนไตรด์ และคาร์บอเนต เป็นต้น

ก๊าซหลายชนิดก็สามารถทำให้เกิดเกลือได้ โดยเมื่อก๊าซทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไอน้ำในอากาศจะกลายเป็นกรด ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับวัสดุก่อสร้างจะกลายเป็นเกลือ โดยก๊าซที่สำคัญได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไอน้ำจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ตามลำดับดังสมการ

$$\underset{\text{(คาร์บอนไดออกไซด์)}}{CO_2} + \underset{\text{(น้ำ)}}{H_2O} \longrightarrow \underset{\text{(กรดคาร์บอนิก)}}{H_2CO_3} \qquad (2.11)$$

$$\underset{\text{(ซัลเฟอร์ไดออกไซด์)}}{SO_2} + \underset{\text{(น้ำ)}}{H_2O} \longrightarrow \underset{\text{(กรดซัลฟูรัส)}}{H_2SO_3} \qquad (2.12)$$

$$H_2SO_3 + O_2 \longrightarrow H_2SO_4 \quad (2.13)$$

(กรดซัลฟูรัส) (ออกซิเจน) (กรดซัลฟูริกหรือกรดกำมะถัน)

เมื่อกรดเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับวัสดุก่อสร้างที่มีสารประกอบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) เป็นองค์ประกอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างเช่น

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \longrightarrow Ca(HCO_3)_2 \quad (2.14)$$

(แคลเซียมคาร์บอเนต) (กรดคาร์บอนิก) (แคลเซียมไบคาร์บอเนต)

$$MgCO_3 + H_2SO_4 \longrightarrow MgSO_4 \quad (2.15)$$

(แมกนีเซียมคาร์บอเนต) (กรดกำมะถัน) (แมกนีเซียมซัลเฟต)

การเปลี่ยนแปลงดังตัวอย่างข้างบน มีบทบาทความสำคัญมากในการเสื่อมสภาพของวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่มีความเจริญทางอุตสาหกรรม "ฝนกรด" ทำให้วัสดุก่อสร้างผุพังและมีคราบสกปรกน่าเกลียด และสร้างปัญหาให้แก่นักอนุรักษ์เป็นอย่างมาก

กระบวนการเสื่อมสภาพที่มีเกลือเป็นต้นเหตุ อาจเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองอย่างผสมกัน ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทำให้วัสดุก่อสร้างสึกกร่อน ขาดความแข็งแกร่ง แตกหัก หรือหลุดร่วงออกเป็นผง เนื่องจากขาดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุก่อสร้างนั้นๆ วัสดุประสานอาจทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือแล้วละลายหายไป ทำให้วัสดุโปร่ง พรุน และอ่อนยุ่ย เกลือบางชนิดทำให้เกิดคราบเปื้อนสีต่างๆ แต่การเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อการผุเปื่อยของวัสดุก่อสร้างอย่างเห็นได้ชัด คือ การที่เกลือแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุที่มีรูพรุนแล้วสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัตถุ โดยมีน้ำเป็นตัวนำพา เมื่อใดที่ความชื้นลดลง น้ำจะระเหยออกไปตรงผิวนอกสุดของวัตถุ เพราะเป็นส่วนที่ร้อนที่สุดและได้รับอิทธิพลจากลมช่วยทำให้น้ำระเหยออกไป เมื่อน้ำที่ผิวนอกสุดระเหยออกไป น้ำจากส่วนที่อยู่ถัดเข้าไปข้างในก็จะเคลื่อนตัวมาแทนที่ น้ำดังกล่าวจะพาเกลือที่ละลายน้ำได้มาด้วย เมื่อน้ำระเหยไป เกลือระเหยไม่ได้จึงมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับหนึ่งซึ่งเป็นจุดอิ่มตัวของสารละลายของเกลือนั้น เกลือจะตกผลึกอยู่ภายในช่องว่างเล็กๆ หรือรูพรุนของเนื้อวัสดุ แต่เนื่องจากความชื้นในเนื้อวัสดุไม่คงที่และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศต่างก็ไม่คงที่ เพราะฉะนั้นในบางขณะความชื้นระเหยออกไปได้มาก จนวัสดุแห้งเกลือจะตกผลึกและบางขณะความชื้นระเหยออกไปได้น้อย เนื้อวัสดุเปียกทำให้เกลือจะละลายน้ำกลายเป็นสารละลาย ในวันหนึ่งๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

กลับไปกลับมาหลายสิบครั้ง การที่เกลือตกผลึกซ้ำแล้วซ้ำเล่าอยู่ภายในเนื้อที่จำกัด ผลึกของเกลือจะมีปริมาตรโตขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิดแรงดันตรงผนังของช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุ และจะ "ระเบิด" ทำให้ผนังของช่องว่างภายในเนื้อวัสดุแตกออก วัสดุก่อสร้างนั้นๆ จะมีสภาพเปื่อยยุ่ยหลุดร่วงออกมาเป็นผุยผง ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นมากตรงบริเวณที่น้ำระเหยออกจากวัสดุก่อสร้างได้มากที่สุด เมื่อนำผงวัสดุที่หลุดร่วงไปวิเคราะห์มักจะพบเกลือที่ละลายน้ำได้อยู่ด้วยเสมอ เกลือที่เกิดขึ้นนี้เป็นเกลือที่ละลายน้ำ จึงถูกฝนชะล้างออกไปเรื่อยๆ คงเหลือแต่วัสดุก่อสร้างที่ผุพังลงไปทุกที เพราะเมื่อผิวเดิมผุเปื่อยและถูกฝนชะออกไป ส่วนที่อยู่ลึกถัดเข้าไปก็จะกลายเป็นที่ที่มีเกลือสะสมอยู่ และจะผุเปื่อยหลุดร่วงหายไปทีละชั้น เป็นเช่นนี้เรื่อยไป

ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้วัสดุก่อสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ได้ก็คือ การที่วัสดุก่อสร้างแทบทุกชนิดที่มีเนื้อพรุนยอมให้อากาศและน้ำผ่านเข้าออกได้ รูพรุนในเนื้อวัสดุวัสดุก่อสร้างเรียกว่า รูเข็ม (Capillary Tube) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.1 – 10 ไมโครเมตร วัสดุก่อสร้างทั่วไปมีรูพรุนขนาดต่างๆ กระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อวัสดุก่อสร้าง ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ช่วยสนับสนุนให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้ดีขึ้นคือ องค์ประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุก่อสร้างเป็นคาร์บอเนต ซิลิเกต อะลูมิเนต และ ออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่มีออกซิเจนหรือไฮดรอกซิล เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ออกซิเจนมีขั้วไฟฟ้าลบ และไฮดรอกซิลมีทั้งขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ขั้วไฟฟ้าบวกและลบเหล่านี้สามารถดึงดูดสารเคมีอื่นๆ ที่มีทั้งขั้วบวกและลบอยู่ด้วย เช่น น้ำ เพราะฉะนั้นผิวหน้าของรูพรุนในวัสดุก่อสร้างซึ่งมีขั้วไฟฟ้าบวกและลบอยู่มากมายจึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้ (Water-Loving Materials หรือ Hydrophillic) หลังจากนั้นโมเลกุลของน้ำก็จะดึงดูดน้ำอีกหลายๆ โมเลกุลเข้ามาเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำสามารถแทรกซึมอยู่เต็มภายในรูเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุได้ นี่คือคำอธิบายว่าเหตุใดวัสดุก่อสร้างจึงเปียกน้ำหรือชื้นได้

แรงดันภายในรูพรุนของเนื้อวัสดุเกิดจากกลไก 2 อย่าง ดังนี้

1. เกลือที่เกิดจากอุณหภูมิสูง เมื่อสูญเสียน้ำไปจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น

2. เกลือที่เกิดจากอุณหภูมิต่ำจะดูดน้ำเข้าไปในผลึกเกลือและทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้น ผลึกเกลือเหล่านี้เรียกว่า ผลึกเกลือที่มีน้ำ (Hydrated Crystal) น้ำที่ผลึกดูดเข้ามาในโมเลกุลเรียกว่า น้ำจากการตกผลึก (Water of Crystallization) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือความชื้นสัมพัทธ์ลดลง ผลึกเหล่านี้จะคายน้ำออกมาเป็นผลึกเกลือที่ปราศจากน้ำ (Anhydrous Crystal) ซึ่งมีขนาดเล็กลง ตัวอย่างของผลึกเกลือที่มีน้ำและผลึกเกลือที่ปราศจากน้ำที่พบบ่อยบนโบราณสถาน ได้แก่

$$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O \rightleftharpoons Na_2SO_4$$

$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O \rightleftharpoons Na_2CO_3$

$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightleftharpoons CaSO_4$

$MgSO_4 \cdot 7H_2O \rightleftharpoons MgSO_4$

การดูดน้ำและคายน้ำของผลึกเกลือเหล่านี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เช่น เกลือโซเดียมซัลเฟตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 32.4 $^{\circ}$C จะอยู่ในรูปของ $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 32.4 $^{\circ}$C จะอยู่ในรูปของ Na_2SO_4 จากการเปลี่ยนแปลงจาก Na_2SO_4 ไปเป็น $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น 308% ในทำนองเดียวกันกับเกลือแมกนีเซียมซัลเฟต จะอยู่ในรูปของ $MgSO_4 \cdot H_2O$ ที่อุณหภูมิระหว่าง -3.9 ถึง 1.8 $^{\circ}$C แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คือ อยู่ระหว่าง 1.8 ถึง 48.3 $^{\circ}$C จะอยู่ในรูปของ $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ การเปลี่ยนแปลงจาก $MgSO_4 \cdot H_2O$ ไปเป็น $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ทำให้ผลึกมีปริมาตรเพิ่มขึ้น 170%

บางครั้งพบว่า มีเกลือเกิดขึ้นกระจัดกระจายเป็นแห่งๆ ไม่สม่ำเสมอ เช่น อิฐบางส่วนมีผลึกเกลือ บางส่วนไม่พบผลึกเกลือ ทั้งนี้เพราะขนาดของรูพรุนด้วยเช่นกัน อิฐส่วนที่มีเนื้อแน่นเกลือจะตกผลึกที่ผิว ส่วนอิฐที่มีเนื้อหยาบมีรูพรุนขนาดใหญ่ เกลือจะตกผลึกอยู่ข้างใน ในกรณีที่มีปูนก่อ ถ้าปูนก่อเนื้อแน่นกว่าอิฐ น้ำจะระเหยออกที่ผิวของอิฐมากกว่าที่ปูนก่อ ทำให้อิฐผุเปื่อยส่วนปูนก่อยังคงสภาพดีอยู่ ในทางตรงกันข้าม อิฐที่มีเนื้อแน่นกว่าปูนก่อ จะไม่ยอมให้น้ำระเหยผ่าน น้ำจึงต้องระเหยที่ปูนก่อ ทำให้เกิดผลึกเกลือบนปูนก่อ ในกรณีนี้ปูนก่อจะผุเปื่อยในขณะที่ยังคงแข็งแรงดีอยู่

การที่ไม่พบผลึกเกลือบนผิววัสดุก่อสร้างไม่ได้หมายความว่าในวัสดุนั้นๆ ไม่มีเกลือ แต่เกลือที่ตกผลึกแล้วอาจถูกฝนชะล้างออกไป หรือเกลืออาจดูดความชื้นกลายเป็นสารละลายแล้วแทรกซึมกลับไปในวัสดุก่อสร้างใหม่ ถ้าฝนตกติดต่อกันเป็นเวลานาน เกลือจะแทรกซึมเข้าไปได้ลึกมาก เมื่อฝนหยุด น้ำจะระเหยออกที่ผิว เกลือจะเคลื่อนที่มาใกล้ๆ ผิวในฤดูแล้ง จึงพบผลึกเกลืออยู่บนผิววัสดุก่อสร้างมากกว่าในฤดูฝน ยกเว้นในส่วนที่ไม่โดนฝนสาด จะพบเกลือได้ในทุกฤดูกาล

ความยากง่ายในการตกผลึกขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลึกและส่วนผสมของสารละลายเกลือ เกลือบางชนิดไม่ค่อยตกผลึกให้เห็น เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพราะดูดความชื้นได้ดีมากจึงมักอยู่ในรูปของสารละลายเกลือ โซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตตกผลึกได้ง่าย แม้มีปริมาณน้อยนิดเดียวก็ตกผลึกได้ ส่วนเกลือโพแทสเซียมซัลเฟตตกผลึก

ยาก จะตกผลึกก็ต่อเมื่อมีเกลืออื่นๆ ร่วมอยู่ด้วย รูปแบบผลึกของเกลือก็เกิดได้หลายรูปแบบ ลักษณะผลึกอาจเป็นรูปเข็ม รูปแท่ง หรือรูปเหลี่ยม เป็นต้น ขึ้นอยู่กับชนิดของเกลือนั้นๆ และปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ องค์ประกอบและสิ่งแปลกปลอมในสารละลาย สภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด ความชื้น ความพรุนของวัสดุก่อสร้าง และอัตราเร็วในการระเหย เป็นต้น ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างกัน เกลือชนิดเดียวกันอาจตกผลึกรูปร่างต่างกัน บางครั้งพบว่าแม้ในจุดเดียวกัน ผลึกที่เกิดขึ้นในตอนแรกๆ มีรูปร่างต่างจากผลึกที่เกิดขึ้นในระยะเวลาต่อมา หรือเกลือที่ตกผลึกโดยมีรูปร่างแบบหนึ่งแล้ว เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป เกลือนั้นๆ จะตกผลึกใหม่ และมีรูปร่างต่างไปจากเดิม เพราะฉะนั้นการดูรูปร่างของผลึกที่ปรากฏบนวัสดุก่อสร้าง ไม่อาจบอกได้ว่าเป็นเกลือชนิดใด

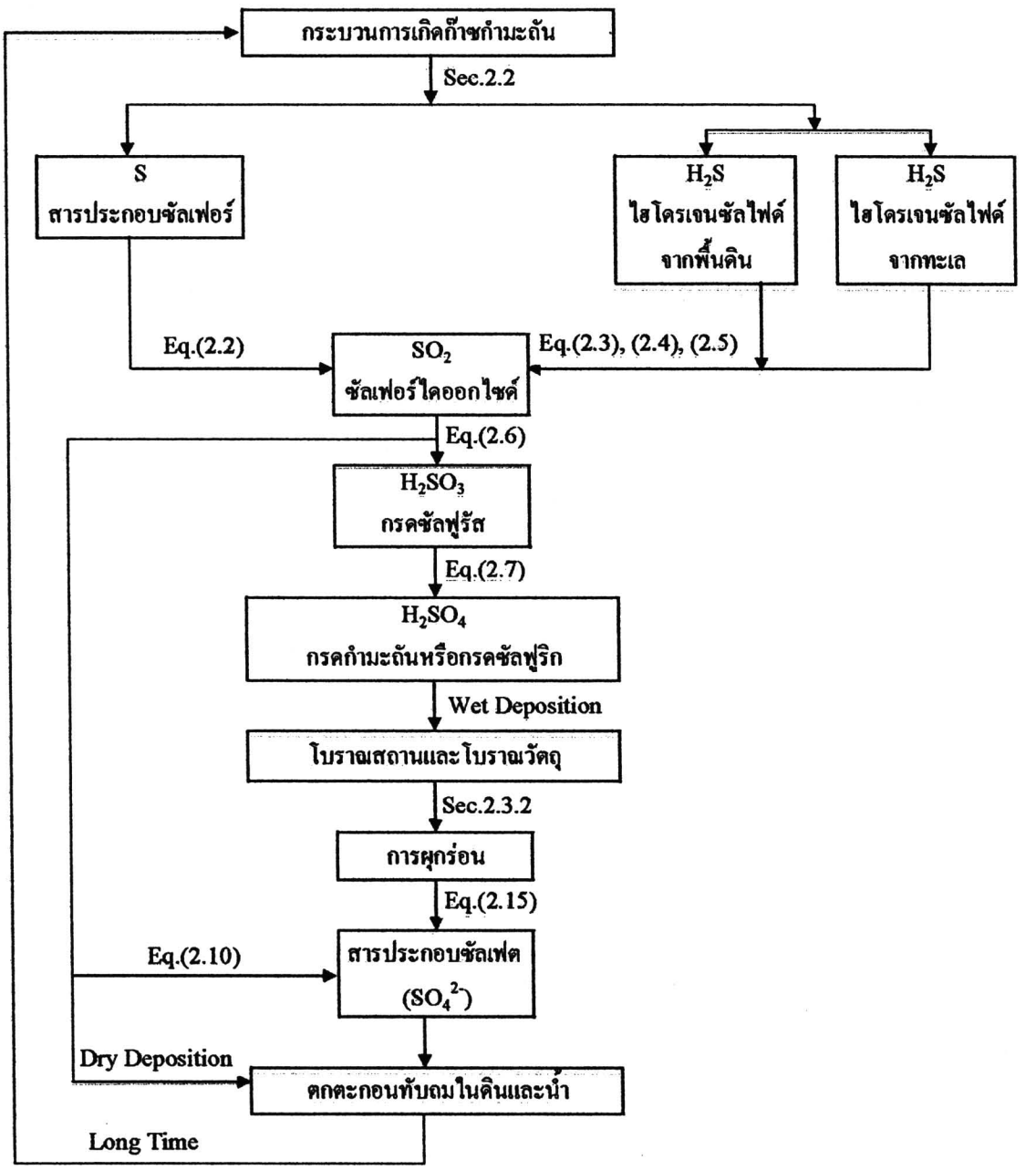
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเกลือเหล่านี้มีแหล่งที่มาจากเกลือที่เป็นองค์ประกอบของดินเอง เกลือที่มาจากน้ำใต้ดิน เกลือที่มีอยู่ในเนื้อวัตถุ และเกลือที่มาจากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะก๊าซมลพิษ ก๊าซที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการเสื่อมสภาพของโบราณสถาน ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นั่นคือเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เมื่อทำปฏิกิริยากับวัตถุโดยเฉพาะที่มีสารประกอบคาร์บอเนตจะกลายเป็นเกลือซัลเฟต ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สำคัญมากในการเสื่อมสภาพของวัตถุ ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาตราบใดที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปะปนอยู่ในอากาศ และปฏิกิริยานี้จะทวีความรุนแรงในที่ที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปะปนอยู่มาก แม้ในอากาศที่บริสุทธิ์ก็มีก๊าซเหล่านี้อยู่ แต่มีเพียงเล็กน้อย ปฏิกิริยาจึงยังคงเกิดอย่างช้าๆ ทีละน้อยๆ อย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไปนานเข้าวัตถุจะสึกกร่อนและปริมาณเกลือก็จะสูงขึ้นเรื่อยๆ

จะเห็นได้ว่าเกลือและความชื้น ต่างก็มีบทบาทต่อการชำรุดเสื่อมสภาพของวัสดุก่อสร้างเท่าเทียมกันอย่างไม่สามารถแยกจากกันได้เด็ดขาด และมักพบปรากฏการณ์ดังกล่าวควบคู่กันเสมอ ถ้ามีเกลืออยู่โดยปราศจากความชื้น เกลือจะเคลื่อนที่ไม่ได้ ไม่สามารถก่อให้เกิดปัญหา ถ้ามีเพียงความชื้นแต่ปราศจากเกลือ วัสดุก่อสร้างคงไม่ผุพังอ่อนยุ่ยถึงระดับนี้

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การที่เกลือบนโบราณสถานจะเป็นชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับ

1. องค์ประกอบของวัสดุ
2. สภาพแวดล้อม

จากกระบวนการเสื่อมสภาพของโบราณสถานและโบราณวัตถุเนื่องจากกรดกำมะถัน สามารถเขียนเป็นวงจรการกัดกร่อนได้ดังนี้



รูป 2.6 กระบวนการเสื่อมสภาพของโบราณสถานและโบราณวัตถุเนื่องจากกรดกำมะถัน

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานการทดสอบการกัดกร่อน

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้า อาจเป็นเดือน ปี หรือหลายปี แต่การทดสอบคุณภาพต้องการผลภายในเวลารวดเร็ว ดั้งนั้นหลักการทดสอบจึงต้องร่นระยะเวลาการเกิดการกัดกร่อนโดยตัดช่วงเวลาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออก หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลเร็วขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องไม่เปลี่ยนกลไกของปฏิกิริยา วิธีการทดสอบต้องเป็นไปเช่นเดียวกับการกัดกร่อนตามธรรมชาติ แต่ใช้เวลาสั้นกว่า [1]

การทดสอบการกัดกร่อน อาจแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1. Laboratory Test : การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เป็นวิธีการที่ใช้ชิ้นงานขนาดเล็ก และใช้ปริมาตรของสารละลายน้อยกว่าที่ของจริง สภาวะต่างๆ จะถูกเลียนแบบให้เป็นไปได้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ ข้อควรระวังในการทดสอบนั้นพอสรุปได้ดังนี้

1.1 การจำลอง (Reproduce) สภาวะจริงในห้องทดลองนั้นทำได้ยากมาก เพราะว่าการใช้สารในการกัดกร่อนบางตัวอยู่ในสภาพไม่เสถียร และยังมีความรุนแรงน้อยกว่าในอุปกรณ์จริงๆ ด้วย ปัญหาอีกอย่างหนึ่งก็ได้แก่ การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านผิววัสดุ การจำลองสภาวะการไหลนี้บนชิ้นทดสอบ จะกระทำอย่างสะดวกได้อย่างไรนั้น ในปัจจุบันไม่สามารถบอกได้นอกจากอาศัยเชาว์ (Intuition) และประสบการณ์เท่านั้น อย่างไรก็ตามการทดสอบในห้องทดลอง ควรเลือกใช้อุปกรณ์ทดสอบที่นำไปสู่ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นทดสอบและของไหลเป็นอย่างดี

1.2 เวลาการทดสอบ การทดสอบในห้องทดลองมักจะไม่มีเวลาเพียงพอ เวลาการทดสอบจะสั้นมากเมื่อเทียบกับอายุอายุการใช้งานสิบๆ ปี ของอุปกรณ์ที่สนใจพิจารณาการกัดกร่อน เมื่อเป็นเช่นนี้จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบแบบเร่ง (Accelerated Test) ข้อมูลสำคัญอยู่ที่การประเมินผลการทดสอบให้สัมพันธ์กับการใช้งาน

2. Pilot Test หรือ Semiwork Test

เป็นวิธีที่ดีที่สุดที่สามารถเลียนแบบ Large Scale Operation ทุกอย่างทั้ง วัตถุดิบ ความเข้มข้น อุณหภูมิ ความเร็ว และ ปริมาณของสารละลาย Pilot Plant จะต้องใช้เวลาในการทดสอบนานพอที่จะได้ผลที่ดี

3. Actual Test

การทดสอบในที่จริง ส่วนมากจะทำโดยการติดตั้งชิ้นตัวอย่างเข้าทดสอบในอุปกรณ์อุตสาหกรรม ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้มากที่สุด แต่มีข้อจำกัดคือ

- จะได้ข้อมูลเฉพาะของส่วนที่จำกัดเท่านั้น วิธีการทดสอบแบบนี้ แม้จะกำจัดปัญหาที่เกี่ยวกับการจำลองสารภายในอุปกรณ์และสารเจือปนที่มีทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามหน้าที่หลักของโรงงานที่กำลังเดินเครื่องอยู่ คือ การคงไว้ซึ่งอัตราการผลิต ดังนั้นต้องหลีกเลี่ยงการทดสอบที่อาจกระทบกระเทือนต่อการผลิต ทำให้ตำแหน่งที่จะทดสอบก็ถูกจำกัด ส่วนใหญ่แล้วการไหลและการถ่ายเทความร้อนก็ไม่ทราบชัดเจน

- ได้ข้อมูลเฉพาะในสภาพการใช้งานปกติเท่านั้น

จากวิธีการทดสอบทั้ง 3 แบบ จะเห็นได้ว่าการทดสอบแบบ Pilot Test และ Actual Test เหมาะสำหรับงานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรมมากกว่า เช่น เครื่องจักรกลต่างๆ เนื่องจาก Pilot Test เป็นการทดสอบในลักษณะจำลองตัวอย่างทดสอบให้เหมือนจริงมากที่สุด เพื่อจะได้เห็นกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจริงกับต้นแบบของจริงทุกอย่าง แต่ในการจำลองลักษณะของโบราณสถานและโบราณวัตถุให้เหมือนจริงนั้นทำได้ยาก เพราะโบราณสถานและโบราณวัตถุแต่ละแห่งมีรูปแบบการก่อสร้างที่ต่างกันออกไป เช่น ส่วนผสมของวัสดุ รูปแบบการเรียงอิฐ เป็นต้น จึงยากที่จะระบุให้แน่ชัดว่าโบราณสถานและโบราณวัตถุแต่ละแห่งมีรูปแบบการก่อสร้างแบบใด ส่วน Actual Test เป็นการทดสอบตัวอย่างในสถานที่จริง ซึ่งหากเป็นโบราณสถานและโบราณวัตถุคงต้องใช้เวลานานจึงจะได้ผลการทดสอบที่ต้องการ

ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ คือการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการก่ออิฐเพื่อใช้เป็นตัวแทนของโบราณสถานและโบราณวัตถุที่ใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้าง แล้วเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนโดยอาศัยปัจจัยหรืออิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ดังจะได้กล่าวต่อไป

2.4.1 อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมต่อการกัดกร่อน

กระบวนการเกิดการกัดกร่อนในธรรมชาติ มีปัจจัยที่จะส่งผลให้เกิดปัญหาของการกัดกร่อนในอิฐที่รุนแรงต่างกันดังนี้

1. อิทธิพลของชนิดสารละลาย

ชนิดของสารละลายในธรรมชาติที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการผุกร่อนมีหลายชนิด เช่น กรดคาร์บอนิก กรดไนตริก กรดกำมะถัน เป็นต้น สารละลายเหล่านี้ทำให้มีรูปแบบการผุกร่อนที่เหมือนกัน คือ การเกิดเกลือในวัสดุ แต่ชนิดของเกลือจะแตกต่างกันออกไปตามสารประกอบทางเคมีของสารละลายแต่ละชนิด สัญญา [13] ได้สรุปชนิดของสารละลายไว้ว่า กรดที่นิยมใช้ในการทดสอบนั้นได้แก่ กรดกำมะถัน (H_2SO_4) กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดไฮโดรคลอริก (HCL) และกรดไนตริก (HNO_3) เป็นต้น ชนิดของกรดที่นิยมใช้เหล่านี้จะมีความรุนแรงที่ต่างกันคือ กรดกำมะถัน และกรดไฮโดรคลอริก เป็นกรดที่แก่กว่าและเกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงกว่า

สำนักงานคณะกรรมการวิจัย ห้องสมุดงานวิจัย

กรดอะซิติก และกรดไนตริก นอกจากนี้ค่า pH ของสารละลายที่ต่างกันก็มีความรุนแรงของการกัดกร่อนที่ต่างกันด้วย ค่า pH ของจะบ่งบอกถึงความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย อัตราการกัดกร่อนจะรุนแรงมากขึ้นเมื่อสารละลายมีความเป็นกรด-ด่างที่แรงมากขึ้น [1]

2. อิทธิพลของอุณหภูมิ

โดยปกติ อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวกระตุ้นให้สารละลายบางชนิดเกิดปฏิกิริยาหรือตกผลึกได้เร็วขึ้น [1] เพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้เปลี่ยนค่า Specific Rate Constant และเป็นการเปลี่ยนแปลงการชนของโมเลกุลด้วย คือ ในอุณหภูมิสูงกว่าจะเกิดการชนกันบ่อยครั้งกว่าและการชนซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาก็มีมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ชนกันมีพลังงานเพิ่มขึ้น [4]

3. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลาย แสดงถึงปริมาณของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นก็จะหมายถึงอัตราส่วนของตัวถูกละลายต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น โดยปกติทั่วไปน้ำจะเป็นตัวทำละลายและกรดจะเป็นตัวถูกละลาย ถ้าความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นมีความเข้มข้นมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นน้อย เพราะการเพิ่มความเข้มข้นทำให้โอกาสของการชนกันระหว่างโมเลกุลเพิ่มตามไปด้วย [4]

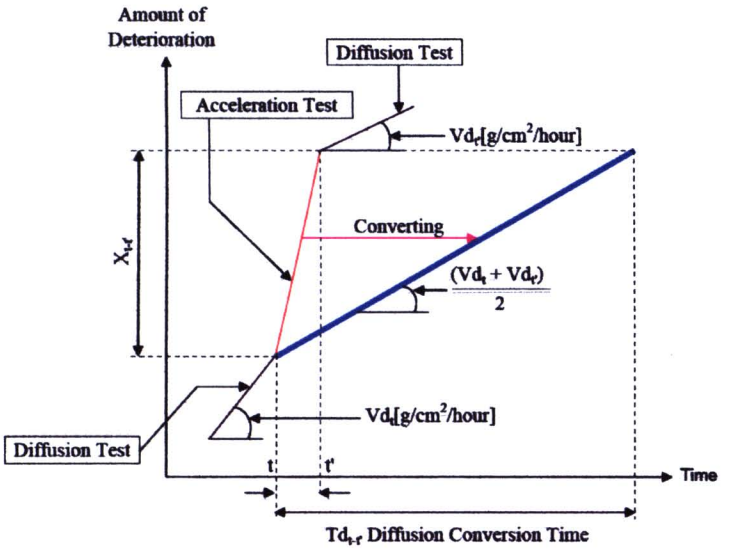
4. สภาวะการสัมผัสสารละลาย

สัญญา [13] ได้สรุปสภาวะการสัมผัสสารละลายไว้ว่า โดยทั่วไปจะมีการศึกษาอยู่ 3 สภาวะ คือ ในสารละลายที่ไม่มีการไหลเวียน ในสารละลายที่มีการไหลเวียน และในสภาวะเปียกสลับแห้ง การสัมผัสโดยแช่อยู่สารละลายที่ไม่มีการไหลเวียน จะมีสภาพการกัดกร่อนน้อยกว่าแช่อยู่ในสารละลายที่มีการไหลเวียนและในสภาวะเปียกสลับแห้ง เนื่องจากบริเวณผิวสัมผัสของคอนกรีตหรือปูนขาว จะเกิดการทำปฏิกิริยาของด่างในคอนกรีตหรือปูนขาวกับกรด จะทำให้ความเข้มข้นของกรดที่ผิวสัมผัสเจือจางลง แต่เมื่อเกิดการไหลเวียนของสารละลาย ความเข้มข้นของกรดบริเวณผิวสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงจะถูกพัดพาไป ทำให้ผิวสัมผัสกรดมีความเข้มข้นคงที่ตลอดเวลา และเกิดการเสียดสีระหว่างอนุภาคของสารละลายกับวัตถุอีกด้วย ส่วนสภาวะเปียกสลับแห้งจะเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของกรดให้สูงขึ้นเมื่อกรดเกิดการตกผลึกที่บริเวณผิวสัมผัส

2.4.2 การเทียบการกระจายตัวของเวลาทดสอบ

การทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาสามารถเทียบเวลาช่วงที่เร่งปฏิกิริยาให้เป็นเวลาตามความเป็นจริงได้ [25] โดยวิธีการเทียบเวลาจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงแรกเป็นช่วงเวลาตามความเป็นจริง ซึ่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามความเป็นจริงของธรรมชาติ ช่วงที่สองเป็นช่วงเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยปัจจัยต่างๆ ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้และต้องไม่เปลี่ยนกลไกของปฏิกิริยา และช่วงที่สามเป็นช่วงระยะเวลาตามความเป็นจริงอีกครั้งหนึ่งดังรูป 2.7 โดยการแปลงค่าของเวลาการแพร่ผ่าน (Diffusion Conversion Time) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

จากการเทียบเวลาการแพร่ผ่านดังกล่าว สามารถนำหลักการเดียวกันนี้มาใช้กับงานวิจัยนี้ได้ โดยจะเปลี่ยนการทดสอบการแพร่ผ่าน (Diffusion Test) ของกราฟช่วงที่ 1 กับ 3 ให้เป็นการทดสอบการเสื่อมสภาพตามกระบวนการของธรรมชาติ ส่วนกราฟช่วงที่ 2 ยังคงเป็นการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาเหมือนเดิม และการแปลงกราฟช่วงเร่งปฏิกิริยาก็ยังใช้สมการที่ 2.16 เหมือนเดิม



รูป 2.7 แนวคิดสำหรับแปลงค่าของเวลาการแพร่ผ่าน

ที่มา : Ikeda et al. [25]

$$\text{Diffusion Conversion Time, } Td_{t-t'} = \frac{X_{t-t'}}{\frac{(Vd_t + Vd_{t'})}{2}} \qquad (2.16)$$

โดยที่ $X_{t-t'}$ คือ ปริมาณการกัดกร่อนแบบเร่งปฏิกิริยาของกราฟช่วงที่ 2

Vd_t คือ ความชันของกราฟช่วงที่ 1

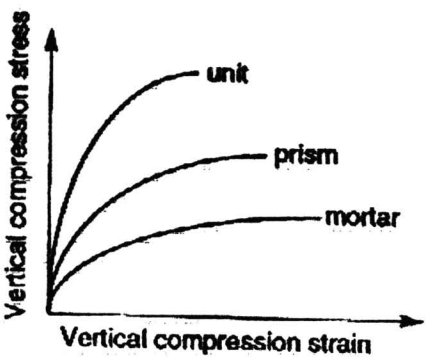
$Vd_{t'}$ คือ ความชันของกราฟช่วงที่ 3

2.5 สมบัติสำคัญอื่นๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของอิฐก่อ

อิฐก่อเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันมานาน ลักษณะการใช้งานของอิฐแตกต่างจากคอนกรีตในเรื่องของความแข็งแรง คือ อิฐที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมาก ในงานก่อสร้างจะใช้อิฐก่อทำเป็นผนังหรือกำแพง ดังนั้นความแข็งแรงของอิฐจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับแรงอัดโดยตรง กำลังอัดของอิฐก่อสามารถหาได้จากการทดสอบตาม ASTM E447 ซึ่งการทดสอบจะทดสอบโดยก่ออิฐเป็นปริซึม หรือเรียกว่าปริซึมอิฐก่อ (Masonry Prism) แล้วทดสอบการรับแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียว ในการก่อสร้างจริงจะมีรูปแบบการก่ออิฐที่แตกต่างกันไป แต่เพื่อความสะดวกในการทดสอบ ตามมาตรฐานโดยทั่วไปแล้ว การทดสอบ Prism กำหนดให้ใช้ Prism ที่ก่อแบบเรียงแนวเดียว (Stack Bond) และกำหนดความสูงได้ตามต้องการ(ปรกติใช้ความสูงประมาณ 1.5 – 5 เท่าของความหนาอิฐ) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ [21]

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของปริซึมอิฐก่อ

ปริซึมอิฐก่อทำขึ้นจากวัตถุสองชนิด คือ อิฐ และ มอร์ต้าร์ ซึ่งวัตถุทั้งสองนี้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่แตกต่างกันมาก เช่น กำลังรับแรงอัด เป็นต้น เมื่อประสานวัตถุสองชนิดขึ้นเป็นปริซึมอิฐก่อ กำลังอัดของปริซึมอิฐก่อจะมีค่าสูงกว่ากำลังของมอร์ต้าร์ แต่จะมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของอิฐ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอิฐมีกำลังรับแรงอัดสูง เมื่อประสานด้วยมอร์ต้าร์ที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำ จึงทำให้ปริซึมอิฐก่อมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่างกลางของอิฐกับมอร์ต้าร์ (รูป 2.8)



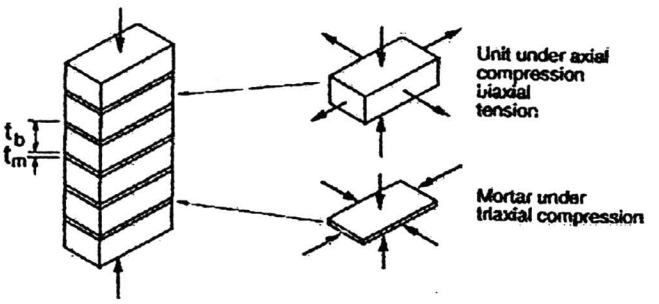
รูป 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัตถุก่อสร้างและปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Drysdale et al. [21]

1. กำลังอัดของมอร์ต้าร์

ภายใต้การรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อ ซึ่งความสามารถในการขยายตัวด้านข้างในอิฐและมอร์ต้าร์ไม่เท่ากัน โดยที่มอร์ต้าร์จะมีความสามารถในการขยายตัวด้านข้างมากกว่าอิฐ ในขณะที่

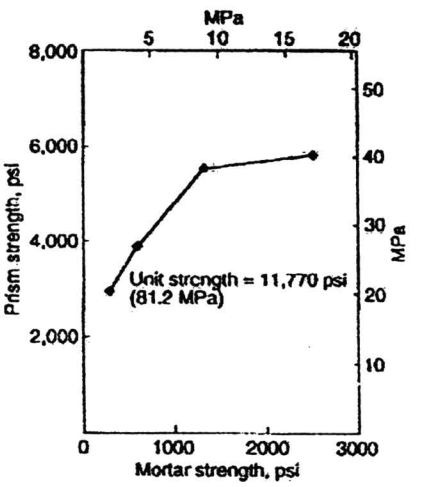
ปริซึมอิฐก่อรับแรงอัดตามแนวแกน มอร์ต้าร์ซึ่งมีความสามารถในการขยายตัวด้านข้างมากกว่าอิฐ จะพยายามขยายตัวด้านข้างในอัตราส่วนที่สูงกว่าการขยายตัวของอิฐ ในขณะเดียวกัน อิฐก็จะพยายามต้านการขยายตัวของมอร์ต้าร์ ดังนั้น อิฐจึงได้รับแรงดึงด้านข้างเพิ่มขึ้นและมอร์ต้าร์ก็มีแรงกดด้านข้างเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งในลักษณะนี้มอร์ต้าร์จะอยู่ในสภาวะ Triaxial (รูป 2.9) ทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์มีค่าสูงกว่าจากการทดสอบโดยลูกบาศก์



รูป 2.9 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในอิฐและมอร์ต้าร์

ที่มา : Drysdale et al. [21]

สำหรับปริซึมที่ก่อด้วยอิฐ ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าปูนก่อ ถ้าปูนก่อที่ใช้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริซึมมีความแข็งแรงมากขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าเลือกใช้ปูนก่อที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากๆ จะไม่มีผลต่อความแข็งแรงของปริซึมมากนักดังรูป 2.10

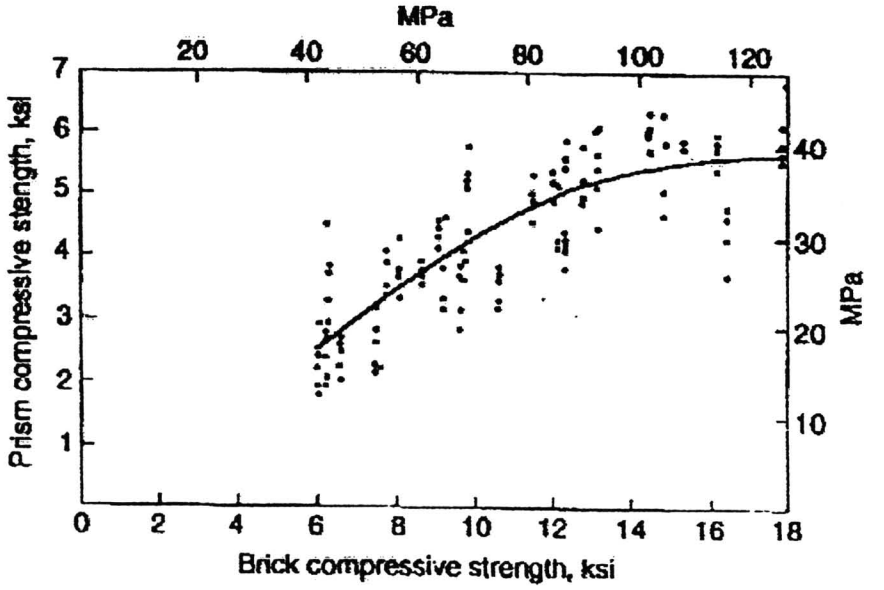


รูป 2.10 ผลกระทบของกำลังอัดปูนก่อต่อกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Drysdale et al. [21]

2. กำลังอัดของอิฐ

กำลังอัดของปริซึมมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของอิฐ แต่การพังทลายของปริซึมแตกต่างไปจากการพังทลายของอิฐ เพราะมีปัจจัยของกำลังดึงและรูปร่างของอิฐมาเกี่ยวข้อง ซึ่งกำลังดึงของอิฐไม่คงที่ตามกำลังอัดของอิฐ จึงทำให้ข้อมูลมีการกระจายตัวที่มากดังรูป 2.11 อย่างไรก็ตาม กำลังดึงของอิฐก็มีแนวโน้มที่มากขึ้นตามกำลังอัดของอิฐที่สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อกำลังอัดของอิฐมีค่าที่สูง กำลังอัดของปริซึมก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตาม

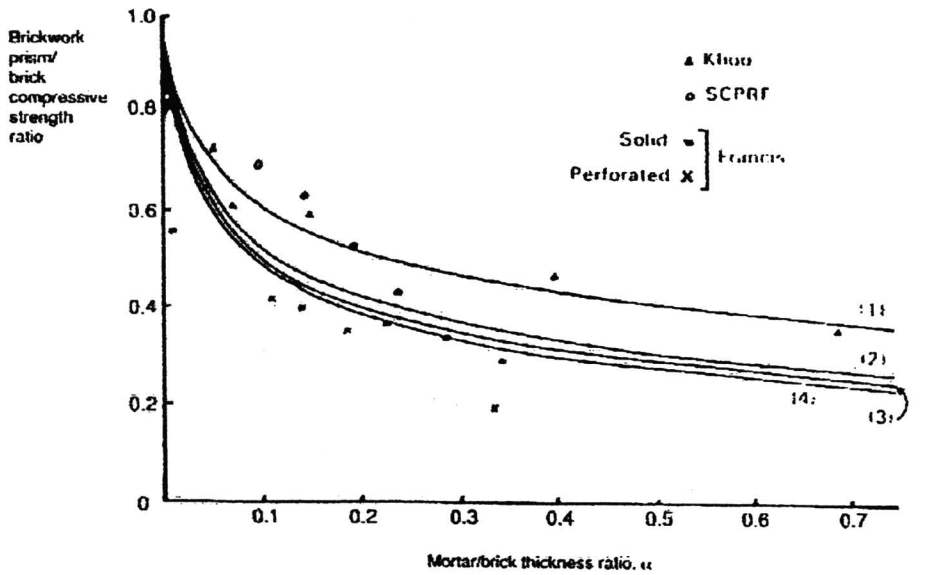


รูป 2.11 ผลกระทบของกำลังอัดของอิฐต่อกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Drysdale et al. [21]

3. ความหนาของมอร์ต้าร์

ตามมาตรฐานโดยทั่วๆ ไปแนะนำให้ใช้ความหนาของปูนก่อประมาณ 10 mm. แต่โดยทั่วไปแล้ว ไม่สามารถก่อให้ปูนก่อมีความหนาเช่นนั้นได้ตลอด โดยความแข็งแรงของปริซึมจะลดลงเมื่อความหนาของปูนก่อเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐ กับอัตราส่วนความหนาของปูนก่อต่อความหนาของอิฐ ถ้าอัตราส่วนของความหนาของปูนก่อต่อความหนาของอิฐสูงขึ้น อัตราส่วนของกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐจะมีค่าลดลง นั่นคือถ้าใช้อิฐชนิดเดียวกันที่มีความหนาคงที่ ความหนาปูนก่อมากขึ้นจะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของปริซึมลดลง

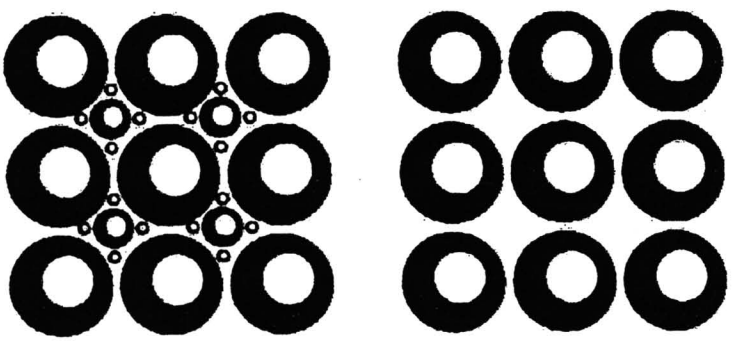


รูป 2.12 ผลของอัตราส่วนความหนาปูนก่อต่อความหนาของอิฐกับกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Hendry [24]

4. การดูดซึมน้ำของอิฐ

โดยปกติแล้วค่าการดูดซึมน้ำของอิฐ ถือว่าเป็นเครื่องชี้วัดความคงทนของอิฐ โดยมีสมมติฐานว่าในอิฐที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงๆ แสดงว่าช่องว่างในเนื้อของอิฐต้องมีมาก ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูป 2.13 นั่นคืออิฐมีความพรุนสูง เพื่อที่จะให้ความชื้น ซึ่งในที่นี้คือน้ำเข้าไปแทรกในช่องว่าง ของอิฐ อิฐลักษณะนี้จึงมีความแข็งแรงน้อย เนื่องจากเมื่อได้รับกำลังภายนอกมากระทำในลักษณะแรงอัดช่องว่างจะถูกอัดให้ยุบตัวลงมาทำให้เกิดการพังทลายลง

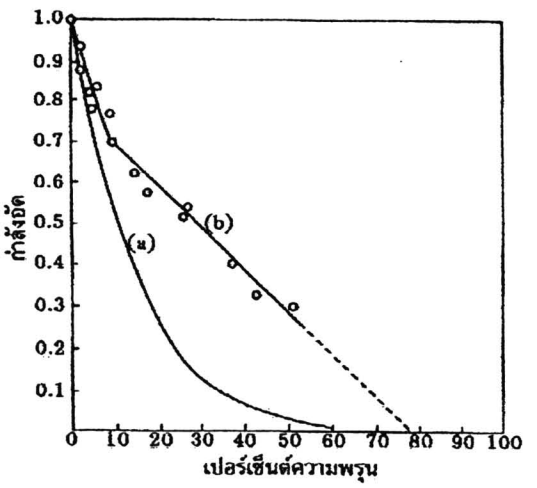


ช่วงว่างมีน้อย ช่องว่างมีมาก

รูป 2.13 สมมติฐานในการวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำ

ที่มา : อุดมวิทย์ [17]

ในทางตรงกันข้าม ถ้าอิฐมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ แสดงว่าในเนื้ออิฐมีช่องว่างน้อย นั่นคือมีความพรุนต่ำ น้ำจึงไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่าง หรือถ้าเข้าไปแทรกได้ก็มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ลักษณะเช่นนี้อิฐจะมีกำลังสูงดังรูป 2.14 เพราะเมื่อได้รับแรงอัดจากภายนอกมากระทำช่องว่างที่มีอยู่เพียงเล็กน้อยอาจยุบตัวลงมา แต่ก็ไม่เพียงพอที่จะทำให้อิฐเกิดการพังทลายเสียหาย อิฐที่มีความพรุนสูง ไม่จำเป็นต้องมีค่าการดูดซึมน้ำสูงตามไปด้วย ขึ้นอยู่กับรูพรุนที่มีอยู่ว่าเป็นชนิดรูพรุนปิด (Closed Pores) หรือ รูพรุนเปิดเชื่อมถึงกัน (Opened Pores)



(a) General Porosity

(b) อิฐชนิดที่มีรูขนาดคงที่ในแนวตั้ง

รูป 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดกับค่าความพรุนของอิฐ

ที่มา : อุดมวิทย์ [17]

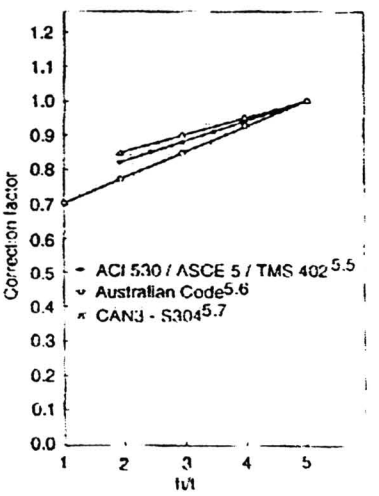
5. อัตราส่วนความสูงต่อความหนาของปริซึมอิฐก่อ

เป็นปรกติของการทดสอบหากำลังรับแรงอัด มักมีตัวแปรของความสูงและความหนาที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของวัตถุเสมอ อัตราส่วนความสูงต่อความหนาของปริซึมอิฐก่อ (h/t) ก็มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อเช่นเดียวกัน โดยถ้าหากว่าอัตราส่วนความสูงต่อความหนาของปริซึมอิฐก่อมีค่าน้อย (ประมาณ 1-3) จะมีอิทธิพลของการยึดรั้งที่ปลายมาเกี่ยวข้องทำให้กำลังของปริซึมอิฐก่อมีค่ามากขึ้น จึงต้องมีการปรับลดกำลังของปริซึมโดยการคูณค่าปรับแก้ดังตาราง 2.2 และ รูป 2.15 ในทางกลับกันถ้าอัตราส่วนความสูงต่อความหนาของปริซึมอิฐก่อมีค่าที่สูงมากขึ้น แนวโน้มกำลังของปริซึมอิฐก่อจะมีค่าที่ลดลงและผลของการยึดรั้งที่ปลายจะมีผลกระทบต่อกำลังของปริซึมอิฐก่อน้อยลง จนไม่มีผลกระทบเลยเมื่ออัตราส่วนความสูงต่อความหนาของปริซึมอิฐก่อมีค่ามากกว่า 5 (รูป 2.16)

ตาราง 2.2 ค่าปรับแก้กำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Indian standard [26]

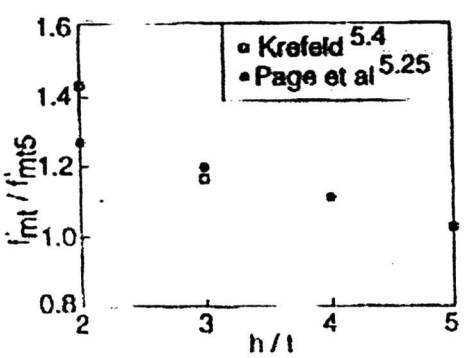
Correction Factors for Different *h/t* Ratios						
Ratio of height to thickness (*h/t*)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0
Correction factors for brickworks[a]	0.73	0.8	0.86	0.91	0.95	1.0
Correction factors for blockworks[a]	1.0	-	1.20	-	1.30	1.37



(a) Clay Brick Masonry

รูป 2.15 ค่าปรับแก้กำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Drysdale et al. [21]



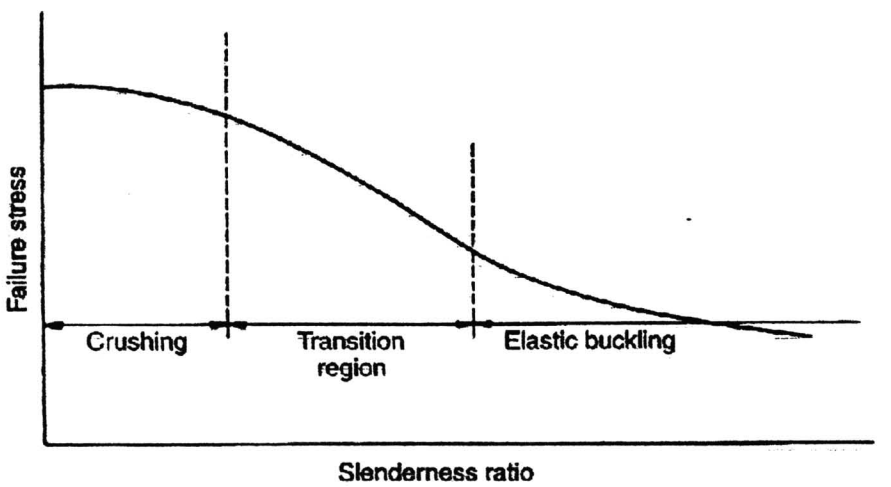
f'_{mt} คือ กำลังรับแรงอัดของปริซึม

f'_{mt5} คือ กำลังรับแรงอัดของปริซึมที่มีความสูงต่อความหนา (h/t) = 5.0

รูป 2.16 ผลกระทบของอัตราส่วนความสูงต่อความหนาของปริซึมอิฐก่อต่อกำลังของปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Drysdale et al. [21]

นอกจากอัตราส่วนความสูงต่อความหนาของปริซึมอิฐก่อ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราส่วนความชลูด (Slenderness Ratio) จะมีผลต่อกำลังของปริซึมอิฐก่อแล้ว ยังสามารถบอกถึงลักษณะการวิบัติที่อาจจะเกิดขึ้นกับปริซึมอิฐก่อได้ดังรูป 2.17 โดยถ้าอัตราส่วนความชลูดของปริซึมอิฐก่อมีค่าน้อย ลักษณะการวิบัติจะเกิดจากแรงอัดซึ่งจะทำให้กำลังของปริซึมอิฐก่อมีค่าสูง และถ้าอัตราส่วนความชลูดของปริซึมอิฐก่อมีค่ามาก การวิบัติของปริซึมจะเกิดจากการโก่งเดาะทางด้านข้างและปริซึมจะมีกำลังลดลง



รูป 2.17 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับอัตราส่วนความชลูดและลักษณะการวิบัติ

ที่มา : Hendry [24]

2.5.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ

Thayaparan [32] ได้สรุปสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ โดยตั้งสมมุติฐานว่า ไม่มีช่องบกพร่องระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุก่อ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งหมดเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอิฐ 1 ก้อนรวมกับวัสดุประสาน 1 ด้าน สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\Delta T = \Delta T_j + \Delta T_b \qquad (2.17)$$

โดยที่ ΔT คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งหมด

ΔT_j คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุประสาน

ΔT_b คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอิฐ

โดยกฎของ Hooke

$$\frac{\sigma T}{E_m} = \frac{\sigma T_j}{E_j} + \frac{\sigma T_b}{E_b} \quad (2.18)$$

$$E_m = \frac{1}{\frac{1-\delta}{E_j} + \frac{\delta}{E_b}} \quad (2.19)$$

โดยที่ σ คือ หน่วยแรง

T คือ ความหนาทั้งหมดของอิฐก่อ

T_j คือ ความหนาของวัสดุประสาน

T_b คือ ความหนาของอิฐ

E_m คือ Modulus of Elasticity ของอิฐก่อ

E_j คือ Modulus of Elasticity ของวัสดุประสาน

E_b คือ Modulus of Elasticity ของอิฐ

$\delta = \frac{T_b}{T}$

$T = T_j + T_b$

Sahlin [31] ได้เสนอการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐและมอร์ต้าร์ ที่จะใช้ในงานอิฐก่อไว้ดังนี้

$$E_b = 300 f_b \quad (2.20)$$

$$E_j = 1000 f_c \quad (2.21)$$

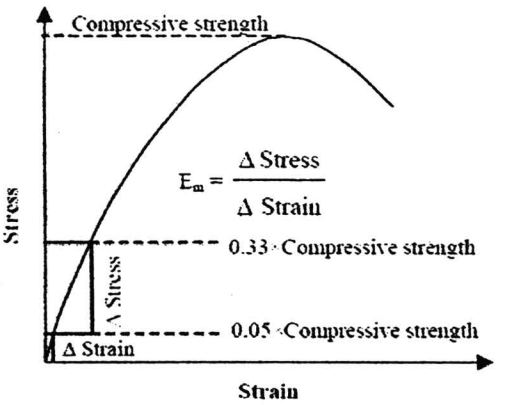
โดยที่ E_b คือ Modulus of Elasticity ของอิฐ (N/mm^2)

E_j คือ Modulus of Elasticity ของมอร์ต้าร์ (N/mm^2)

f_b คือ กำลังอัดสูงสุดของอิฐ (N/mm^2)

f_c คือ กำลังอัดสูงสุดของมอร์ต้าร์ (N/mm^2)

Indian standard [26] ได้สรุปการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของปริซึมอิฐก่อจากมาตรฐาน โดยสามารถคำนวณได้จากเส้นคอร์ดของความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain โดยใช้เส้นคอร์ดที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 – 0.33 เท่าของกำลังอัดประลัยของปริซึม ดังรูป 2.18

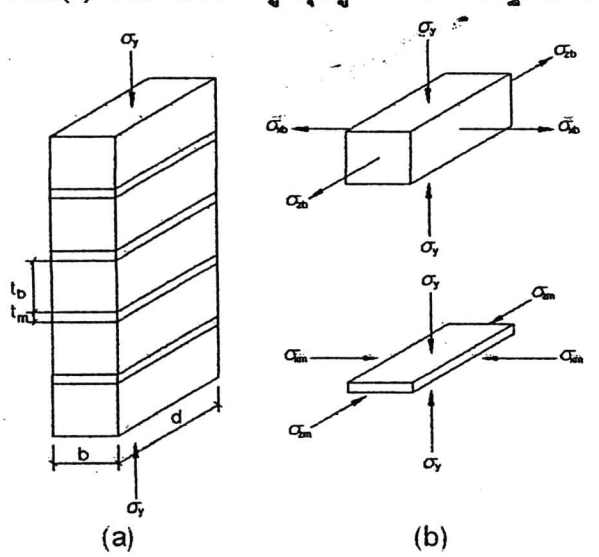


รูป 2.18 โมดูลัสยืดหยุ่นจากเส้นคอร์ด

ที่มา : Indian standard [26]

2.5.3 การวิบัติของปริซึมอิฐก่อบนพื้นฐานการวิเคราะห์ความยืดหยุ่น

Francis et al. [22] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของปริซึมอิฐก่อ ภายใต้แรงอัดตามแนวแกน โดยเมื่อพิจารณาปริซึมอิฐก่อที่มีแรงอัดตามแนวแกนมากระทำ หน่วยแรงกดในแนวแกน (σ_y) ดังรูป 2.19(a) จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงด้านข้างในอิฐและเกิดหน่วยแรงอัดด้านข้างในมอร์ต้าร์ ในทิศทาง X และ Z ดังรูป 2.19(b) ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ที่จุดศูนย์กลางของอิฐและมอร์ต้าร์



รูป 2.19 หน่วยแรงในปริซึมอิฐก่อ

ที่มา : Francis et al. [22]

ความเครียดเนื่องจากการขยายตัวด้านข้างของอิฐ คือ

$$\varepsilon_{xb} = \frac{1}{E_b}\left[\sigma_{xb} + \nu_b\left(\sigma_y - \sigma_{zb}\right)\right] \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_{zb} = \frac{1}{E_b}\left[\sigma_{zb} + \nu_b\left(\sigma_y - \sigma_{xb}\right)\right] \quad (2.23)$$

ความเครียดเนื่องจากการขยายตัวด้านข้างของมอร์ต้าร์ คือ

$$\varepsilon_{xm} = \frac{1}{E_m}\left[-\sigma_{xm} + \nu_m\left(\sigma_y - \sigma_{zm}\right)\right] \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_{zm} = \frac{1}{E_m}\left[-\sigma_{zm} + \nu_m\left(\sigma_y - \sigma_{xm}\right)\right] \quad (2.25)$$

โดยที่ E_b คือ Modulus of Elasticity ของอิฐ

E_m คือ Modulus of Elasticity ของมอร์ต้าร์

ν_b คือ อัตราส่วนปัวซองของอิฐ

ν_m คือ อัตราส่วนปัวซองของมอร์ต้าร์

จากสมดุลผลรวมแรงดึงด้านข้างในอิฐจะเท่ากับผลรวมแรงอัดด้านข้างในมอร์ต้าร์ ดังนั้น

$$\sigma_{xm} = \alpha\sigma_{xb} \quad (2.26)$$

$$\sigma_{zm} = \alpha\sigma_{zb} \quad (2.27)$$

โดยที่ α คือ อัตราส่วนความหนาของอิฐ (t_b) ต่อความหนาของมอร์ต้าร์ (t_m)

เนื่องจากความเครียดด้านข้างของอิฐและมอร์ต้าร์เท่ากัน ดังนั้นจะได้ว่า

$$\sigma_{xb} = \sigma_{zb} = \frac{\sigma_y\left(\beta\nu_m - \nu_b\right)}{1 + \alpha\beta - \nu_b - \alpha\beta\nu_m} \quad (2.28)$$

โดยที่ $\beta = \frac{E_b}{E_m}$

เนื่องจากสมมติฐานของความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดประลัยและหน่วยแรงดึงด้านข้างเป็นเส้นตรง ดังรูป 2.20 สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\sigma_{xb} = \frac{1}{\phi}\left(\sigma'_{ult} - \sigma_{ult}\right) \tag{2.29}$$

และ $$\phi = \frac{\sigma'_{ult}}{\sigma'_{t}} \tag{2.30}$$

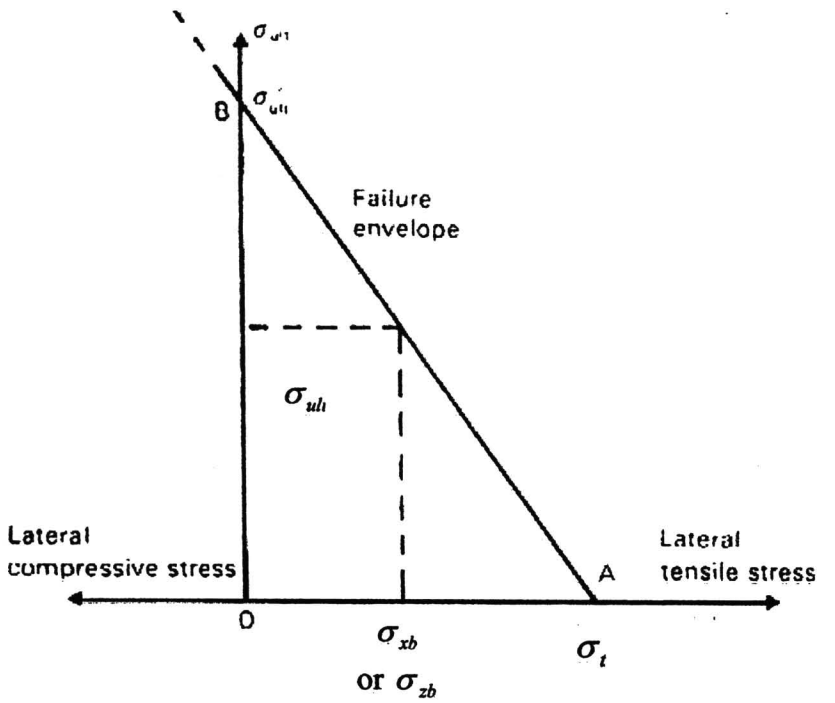
โดยที่ σ'_{ult} คือ กำลังอัดประลัยของอิฐเมื่อไม่มีหน่วยแรงดึงด้านข้าง

σ_{ult} คือ กำลังอัดประลัยของอิฐเมื่อมีหน่วยแรงดึงด้านข้าง

σ'_{t} คือ หน่วยแรงดึงด้านข้างสูงสุดเมื่อแรงอัดเป็นศูนย์

σ_{xb} คือ หน่วยแรงดึงด้านข้างของอิฐในทิศทาง X

σ_{zb} คือ หน่วยแรงดึงด้านข้างของอิฐในทิศทาง Z



รูป 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดประลัยและหน่วยแรงดึงด้านข้างของอิฐ

ที่มา : Francis et al. [22]

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.29) และ (2.30) ในสมการที่ (2.28) โดยไม่สนใจพจน์ (1-ν_b) และให้ $\sigma_y = \sigma_{ult}$ จะได้ว่า

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{ult}^{'}} = \frac{1}{1+\frac{\phi(\beta\nu_m - \nu_b)}{\alpha\beta(1-\nu_m)}} \tag{2.31}$$

โดยความถูกต้องขึ้นอยู่กับการประมาณค่า ϕ, ν_b และ ν_m