

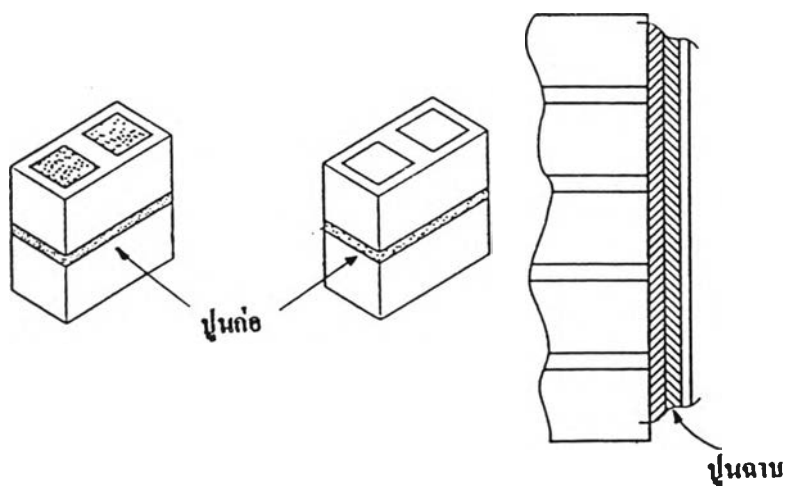
บทที่ 2

การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนก่อและปูนฉาบในงานศิลปกรรม

ปูนก่อหรือปูนสอ (Mortar) หมายถึง ของผสมที่ได้จากการผสมวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุยึดเหนี่ยว (Binder) กับมวลสารประกอบเพิ่มความแข็งแรง (Aggregate) รวมเข้ากับน้ำและอาจมีสารเติมแต่งชนิดอื่น (Additive)

วัตถุประสงค์ของการสร้างปูนก่อจะเป็นไปเพื่อยึดวัสดุเข้าด้วยกัน (Masonry mortar) หรือก่อส่วนที่ไม่ได้รับน้ำหนัก โดยปกติแล้วไม่สามารถกันน้ำได้ จึงต้องฉาบคลุมด้วยปูนฉาบ (Protective mortar หรือ Mortar for Plaster หรือ Plaster) ซึ่งสร้างจากวัสดุชนิดเดียวกันอีกครั้งหนึ่งเป็นอย่างน้อย ลักษณะของปูนก่อและปูนฉาบแสดงได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของปูนก่อและปูนฉาบ

สามารถแบ่งประเภทของปูนก่อได้ตามชนิดของมวลสารประกอบที่ผสมอยู่ เช่น หากใช้ดินเป็นมวลสารประกอบ เรียกว่า ดินสอหรือดินก่อ (Mud mortar หรือ Clay

mortar) และหากใช้ปูนขาวเป็นมวลสารประกอบจะเรียกว่า ปูนสอหรือปูนก่อ (Lime mortar) เช่นเดียวกันกับปูนฉาบ (Plaster) จะเรียกชื่อตามมวลสารที่เป็นองค์ประกอบ เช่น Mud plaster Clay plaster และ Lime plaster ในยุคแรกเริ่มมักจะใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุเพื่อ งานก่อ แต่เนื่องจากดินเหนียวไม่คงทนต่อน้ำและความชื้น จึงได้พัฒนามาใช้ปูนขาวเป็น วัสดุเพื่องานก่อหรือฉาบแทน

อย่างไรก็ตาม พบว่าปูนก่อและปูนฉาบที่ใช้ปูนขาวผสมกับทรายเข้าด้วยกัน ในอัตราส่วน 1:2 หรือ 1:3 นั้น เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดเหนี่ยว ปกป้องความแข็งแรง และทนทานสูงกว่าปูนก่อและปูนฉาบที่เตรียมจากปูนขาวและทรายในอัตราส่วนอื่นๆ จึงเหมาะ สำหรับการเชื่อมประสานอิฐ เนื่องจากปูนก่อและปูนฉาบดังกล่าว มีค่าการรับกำลังอัด (Compressive strength) อยู่ระหว่าง 50 - 300 psi (ใน 28 วัน) น้อยกว่าอิฐหรือหินเล็กน้อย (Speweik, 2002) เมื่ออิฐหรือหินได้รับความร้อนจากแสงแดด อุณหภูมิของอิฐหรือหิน จะสูงขึ้น บางกรณีอาจสูงถึง 50 องศาเซลเซียส (จิราภรณ์ อรัณยะนาค, 2544) เป็นเหตุ ให้อิฐหรือหินดังกล่าวขยายตัว เกิดแรงกดดันต่อปูนก่อและปูนฉาบ หากว่าปูนก่อหรือปูน ฉาบมีความแข็งแรงกว่าอิฐแล้ว เมื่อเกิดการขยายตัวของอิฐหรือหิน จะทำให้เกิดการแตกร้าว ของอิฐ หรือหินได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาแตกร้าวของอิฐหรือหิน จึงมักใช้ปูนก่อหรือ ปูนฉาบจากปูนขาวและทรายในงานศิลปกรรม

2.1.1 วัสดุที่ใช้สร้างปูนก่อและปูนฉาบ

ศิลปกรรมแขนงต่าง ๆ ของไทย ทั้งทางด้านสถาปัตยกรรม ประติมากรรม ฯลฯ ที่สร้างจากภูมิปัญญาผนวกกับความสามารถเชิงศิลป์อย่างสูงของช่างไทยโบราณนั้น ส่วนใหญ่มีปูนก่อและปูนฉาบเป็นองค์ประกอบสำคัญ เนื่องจากวัสดุก่อที่มีคุณภาพที่สุดสำหรับ โบราณสถาน คือ ปูนขาว

ปูนก่อและปูนฉาบดังกล่าวจะสร้างจากการผสมปูนขาวที่อิมน้ำกับทราย อัตรา ส่วนระหว่างปูนขาวกับทรายที่ผสมกันนั้น ต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ใน งานที่ต้องการความแข็งแรงมาก เช่น งานก่อเพื่อการรับน้ำหนัก จะใช้ทรายปริมาณมาก แต่สำหรับงานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อตกแต่ง แสดงออกซึ่งลวดลายทางศิลปะนั้น ช่างมักใช้ปูน ขาวในอัตราที่สูงกว่างานก่อที่ต้องรับน้ำหนัก

อย่างไรก็ตามอัตราส่วนระหว่างปูนขาวและทรายต้องอยู่ในภาวะสมดุลเหมาะสม กล่าวคือ ถ้าผสมโดยใช้ปูนขาวมากเกินไป เนื้อปูนที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูง ขึ้นรูปง่าย คงตัวอยู่ได้นาน แต่แห้งหรือแข็งตัวช้า ขณะที่การใช้ทรายในปริมาณมาก จะทำให้เนื้อปูนพร่องปูนขาวที่ใช้เพื่อการยึดเหนี่ยว เนื้องานจะไม่คงรูป แตกกะเทาะหรือหลุดล่อนง่าย ดังนั้นการใช้อัตราส่วนระหว่างปูนขาวและทราย ต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์โดยคำนึงถึงความสมดุลเป็นสำคัญ ซึ่งในส่วนของปูนก่อหรือปูนฉาบที่ใช้ในงานศิลปกรรมนั้น ช่างไทยมักใช้อัตราส่วนระหว่างปูนขาวและทราย 1 : 3

2.1.1.1 ปูนขาว (Lime)

ในทางการค้า ปูนขาว (Hydrated lime) หมายถึง ปูนที่ได้จากการผสมปูนดิบกับน้ำ พอที่จะรวมกันทำปฏิกิริยาทางเคมีเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มอก. 598, 2528)

มีลักษณะเป็นผงแห้งสีขาว ซึ่งมักจะประกอบด้วย (มอก. 202 เล่ม 1, 2520)

- (1) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ
- (2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ แมกนีเซียมออกไซด์ หรือ
- (3) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ
- (4) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

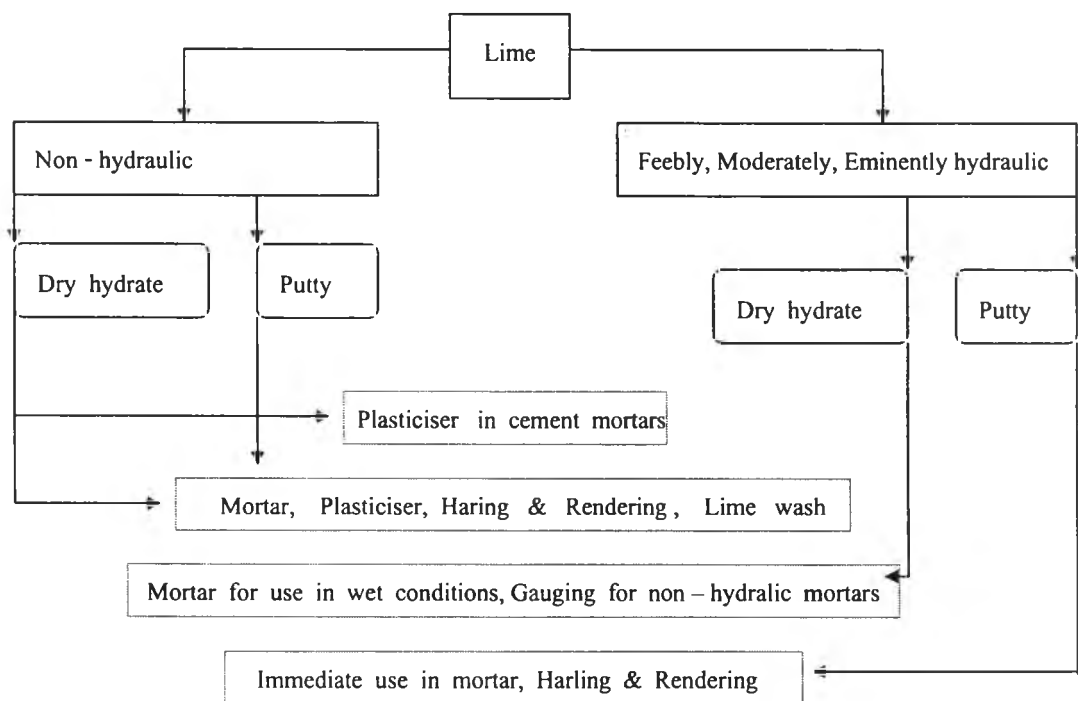
เนื่องจากองค์ประกอบที่ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก จึงทำให้งานก่อจากปูนขาวมีความแข็งแรง เพราะแรงยึดโยงโครงสร้างด้วยพันธะของแคลเซียมที่มีต่อวัสดุที่เป็นมวลประกอบ เช่น ทราย ทำให้เกิดแรงยึดเป็นรูปทรงขึ้น

ปูนขาวทั่วไปมี 2 ประเภท คือ ปูนขาวไฮดรอลิก (Hydraulic lime) และปูนขาวนอนไฮดรอลิก (Non – hydraulic lime) ปูนขาวทั้ง 2 ประเภทต่างกันดังนี้

ปูนขาวไฮดรอลิก เป็นปูนขาวที่มีส่วนผสมของดินเหนียว ซิลิกาหรืออลูมินาปน สิ่งเจือปนดังกล่าวมาจากขั้นตอนการเผาหินปูนและขั้นตอนที่หินปูนแตกตัวด้วยน้ำ (Slake) ปูนขาวไฮดรอลิกสามารถแข็งตัวได้ในสภาวะแบบเปียก จึงอาจเรียกว่า Water lime มีรายงานการศึกษาพบว่าปูนขาวไฮดรอลิกความแข็งแรงมากกว่าปูนขาวนอนไฮดรอลิก

สำหรับปูนขาวอนไฮดรอลิกนั้นไม่มีการเจือปนของดินเหนียว ซิลิเกตหรือ อลูมินาปน แต่มีการเจือปนของแคลเซียมคาร์บอเนตสูง บางครั้งจึงเรียกว่า ปูนขาว แคลเซียมสูง (High calcium) ปูนขาวอนไฮดรอลิกไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแข็งตัวได้ในสภาวะแบบเปียก ต้องทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจึงจะแข็งตัว จึงเรียกว่า Air lime อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศของปูนขาวอนไฮดรอลิกจะช้ากว่าปูนขาวไฮดรอลิกและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงของปูนโดยตรง บางครั้งจึงมีการนำปูนขาวไฮดรอลิกมาผสมในปูนขาวอนไฮดรอลิกเพื่อให้ปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศได้เร็วขึ้นและเพิ่มความแข็งแรง

ปูนขาวในทางการค้าทั้งประเภทอนไฮดรอลิกและไฮดรอลิกนั้นสามารถนำไปใช้งานได้ในลักษณะต่าง ๆ ได้ ดังแผนภาพที่ 2.2 อย่างไรก็ตามปูนขาวที่ใช้ในงานศิลปกรรมมักเป็นปูนขาวอนไฮดรอลิก



ภาพที่ 2.2 การใช้ประโยชน์จากปูนขาว

กระบวนการนำปูนขาวมาใช้นั้น เริ่มต้นจากการนำหินปูน (Lime stone) ซึ่งหมายถึง หินที่อยู่ในกลุ่มของหินชั้น (Sedimentary rock) จากภูเขาแหล่งต่างๆของประเทศมาใช้ ซึ่งหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต(CaCO_3) นั้น ถ้าเป็นหินปูนบริสุทธิ์จะประกอบ

ด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ประมาณร้อยละ 98 : ที่เหลือเป็นอนุโมลคาร์บอเนต (CO₃²⁻) จัดอยู่ในกลุ่มหินปูนแคลเซียมสูง

ในส่วนของหินปูนที่ไม่บริสุทธิ์ พบว่าประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ ร้อยละ 54.35 แมกนีเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 45.65 ที่เหลือเป็นอนุโมลคาร์บอเนต หินปูนประเภทนี้ ถ้าประกอบด้วยแมกนีเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 ขึ้นไป จะเรียกว่า ปูนขาวแมกนีเซียม (Magnesium limestone) แต่ในกรณีที่หินปูนนั้นมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตมากกว่า ร้อยละ 25 จะเรียกว่า หินปูนโดโลมิติก (Dolomitic limestone)

ปูนขาวที่เกิดจากหินปูนที่ประกอบด้วยแมกนีเซียมสูง จะทำให้ปูนขาวนั้นเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำได้ยาก ในทางตรงกันข้ามถ้าหินปูนประกอบด้วยแคลเซียมสูงจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้ดีกว่า

ในประเทศไทย ปูนขาวที่ใช้ทางการค้ามักเป็นปูนขาวจากภูเขาทางภาคกลางของประเทศ เช่น จังหวัดสระบุรี ราชบุรี และเพชรบุรี ฯลฯ หินปูนจากภูเขาที่ได้มา จะถูกนำมาเผาในเตาเผาปูนที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,000 - 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อได้คาร์บอนไดออกไซด์และให้หินปูนเปลี่ยนแปลงเป็น “ ปูนสุก ” หรือ Quick lime หรือ แคลเซียมออกไซด์อย่างทั่วถึง หินปูนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงนี้จะแตกออกเป็นขนาดใหญ่อเล็กต่างกันไปและจะมีน้ำหนักน้อยกว่าหินปูนก่อนการเผาประมาณกึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบโดยปริมาตรที่เท่ากัน ปฏิกิริยาของการเผาหินปูนและได้ปูนสุกนั้นแสดงได้ดังสมการเคมีต่อไปนี้



จากนั้นจะนำออกจากเตาเผามาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ เรียกว่า ขั้นตอนการ “ ผึ่งปูน ” แล้วใช้น้ำพรมบนปูนเหล่านี้ ซึ่งจะทำให้ได้ผงปูนขาวร่วงหล่นจากก้อนปูน บดให้ละเอียด ก็จะเป็นปูนขาวทางการค้าพร้อมที่จะใช้ประโยชน์ต่อไป แต่สำหรับปูนโบราณที่ใช้ในงานศิลปกรรมนั้น หลังจากที่เผาหินปูนและได้ปูนสุกแล้ว ปูนสุกที่ยังมีลักษณะเป็นก้อนขนาดต่าง ๆ นั้น จะถูกนำไปหมักในน้ำ เมื่อครบระยะเวลาที่

เหมาะสมจึงนำมาใช้งาน. ดังนั้นปูนโบราณที่ใช้ในงานศิลปกรรมจึง ไม่ผ่านขั้นตอนการผึ่งปูน และทำให้ละเอียด

2.1.1.2 ทราย (Sand)

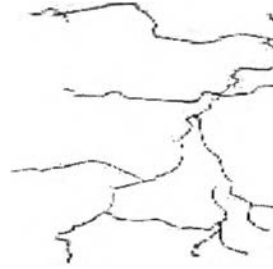
ทรายเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ผสมกับปูนขาวอิมน้ำ (Hydrated lime) หรือปูนขาวที่ผ่านการหมักในน้ำมาแล้วเพื่อก่อเป็นปูนก่อหรือปูนฉาบ เนื่องจากทรายทำให้เกิดความมั่นคงแข็งแรงของงาน ทำให้เนืองานแน่นแข็ง และคงรูปได้ดี หากใช้ทรายในปริมาณพอเหมาะจะช่วยไม่ให้ปูนแตกร้าว ส่วนปูนที่ไม่ผสมทรายเมื่อแห้งจะแตกร้าวมาก

ทรายที่ควรนำมาใช้งานเป็นทรายน้ำจืด ปราศจากการเจือปนของดิน หิน เกลือ หรือวัสดุเจือปนอื่นๆ ไม่ควรใช้ทรายจากทะเล เนื่องจากทรายเป็นดั่งกล่าวมีปริมาณเกลือสูง เมื่อนำมาก่อเป็นงานศิลปกรรม เกลือที่อยู่ในเนื้อปูนจะตกผลึกเป็นของแข็งคันเนื้อปูนให้ผุกร่อน เสื่อมสภาพได้ง่าย นอกจากนี้ทรายที่นำมาใช้ควรแห้งสนิท เนื่องจากปกติทรายจะมีความชื้นอยู่ในอนุภาคโดยเฉพาะทรายที่มีความละเอียดจะมีความชื้นมากกว่าทรายหยาบมีผลให้ปริมาณของทรายเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาผสมกับปูนขาวเพื่อใช้งาน อาจก่อให้เกิดผลเสียต่องานได้ เนื่องจากอัตราส่วนของทรายที่นำมาใช้ไม่เป็นไปตามที่ควรจะเป็น

ขนาดของทรายมีผลต่อการก่อและการฉาบ เนื่องจากขนาดของทรายส่งผลให้ความพรุนหรือขนาดช่องว่างในเนืองานต่างกันออกไป ทรายขนาดเล็กหรือทรายที่มีความละเอียดสูงกว่าจะให้ขนาดช่องว่างในเนืองานต่ำ ลักษณะนี้ตรงข้ามกับทรายที่มีขนาดใหญ่หรือทรายหยาบ

รายงานการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ถ้าผสมปูนขาวที่อิม กับทรายขนาดเดียวกัน ในอัตราส่วนระหว่างปูนขาวและทรายต่างกันก็ทำให้พื้นที่ความพรุน โดยปริมาตรต่างกันด้วย กล่าวคือ การเพิ่มอัตราส่วนของทรายจะทำให้การผ่านเข้าออกของอากาศเป็นไปได้ดีขึ้น เมื่อมีการซึมเข้าของน้ำสู่เนื้อปูน น้ำที่ซึมเข้ามาระเหยได้เร็วขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมกับงานจึงเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมระหว่างปูนขาวและทรายนั้นจะทำให้เกิดการแตกร้าวในลักษณะดังภาพที่ 2.3

อย่างไรก็ดี การเลือกขนาดของทรายก็มีความสำคัญ ทรายที่มีขนาดใหญ่ จะยากต่อการก่อหรือฉาบ ตรงข้ามกับทรายขนาดเล็กที่ก่อหรือฉาบและตกแต่งให้สวยงามได้ง่ายกว่า งานศิลปกรรมจึงมักใช้ทรายที่มีขนาดไม่ใหญ่นัก



ภาพที่ 2.3 ลักษณะแตกร้าวของปูนก่อหรือปูนฉาบที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างปูนขาวและทรายไม่เหมาะสม

2.1.2 กรรมวิธีการสร้างปูนก่อและปูนฉาบ

ขั้นตอนของการสร้างปูนก่อและปูนฉาบนั้น ใช้วัสดุที่เป็นองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ปูนขาว และทราย ดังกล่าวข้างต้น โดยแบ่งขั้นตอนได้ 2 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัสดุ และการก่อหรือฉาบ

2.1.1.1 การเตรียมวัสดุ

ปูนขาวที่จะนำมาผสมกับทรายนั้นจะต้องเป็นปูนขาวที่อิมด้วยน้ำ อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ หรือเรียกว่า “Lime putty” มีลักษณะเหนียวข้น สีขาวขุ่น ปูนขาวลักษณะนี้ได้จากการแช่ปูนขาวในน้ำหรือที่เรียกกันว่า การหมักปูน เป็นเวลาอย่างน้อย 2 สัปดาห์ เพื่อให้ปูนดิบทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างสมบูรณ์

อนึ่งการหมักปูนนั้น ปรากฏหลักฐานว่ามีมาเป็นเวลานานแล้ว ไม่ใช่สิ่งที่ค้นพบใหม่ดังปรากฏหลักฐานที่วิทรูเวียส (Vitruvius) สถาปนิกชาวโรมัน บันทึกไว้ว่า

“When it [the lime] is slaked, let it be mingled with the sand in such a way that if it is pit sand three of sand and one of lime is poured in; but if the same is from the

river or sea, two of sand and one of lime is thrown together. For in this way there will be the right proportion of the mixture and blending.” (Anderegg, 1931 อ้างถึงใน www.rcadiaricerche.it/indici%20libri/abstracts%2020000.htm)

(“ เมื่อปูนขาวอิมน้ำแล้ว นำไปผสมกับทราย ซึ่งถ้าเป็นทรายจากน้ำจืดให้ใช้อัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนขาวเท่ากับ 3:1 แต่ถ้าเป็นทรายจากทะเลใช้อัตราส่วนเท่ากับ 2:1 อัตราส่วนนี้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน ”) (สิรินารี, แปล)

รายงานการศึกษาพบว่าในโลกตะวันตกที่มีการเริ่มใช้ปูนขาวมาเป็นปูนก่อและปูนฉาบ ประมาณ 10,000 ปีมาแล้ว โดยพบสิ่งก่อสร้างจากปูนขาวแถบตะวันออกเฉียงของประเทศตุรกี (Byrne, 2002) สำหรับโลกตะวันออกนั้นปรากฏหลักฐานของการใช้เก่าแก่ที่สุดในประเทศอียิปต์ (www.cf.ac.uk/engin/research/concmas/cs_7.htm, 2002) ซึ่งใช้ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างในบางส่วนของพีระมิด สำหรับวิธีการเตรียมปูนหมักและการฉาบปูนพบว่ามีขั้นตอนและวิธีที่ใกล้เคียงกันทั้งสิ้น

รายงานการศึกษาพบว่าการหมักปูนในระยะยาวจะเกิดผลดีกว่าการหมักปูนในระยะสั้นๆ (Cazalla et al, 2000) จึงพบว่าบางแห่งหมักเป็นปีเพื่อให้แคลเซียมออกไซด์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จนหมด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เปลี่ยนสภาพกลับไปเป็นหินปูนที่มีความแข็งแรงเช่นเดิมได้อย่างสมบูรณ์ต่อไป

ในขั้นตอนการหมักปูน ทั้งที่เป็นปูนโบราณเพื่องานศิลปกรรมและปูนขาวทางการค้า เมื่อใส่ปูนลงไปใต้น้ำจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน ให้กวนปูนไปจนปฏิกิริยาสิ้นสุดระหว่างการหมักปูนให้เปลี่ยนน้ำที่ใสเป็นประจํา เพื่อให้แคลเซียมออกไซด์จะได้ทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจนในโมเลกุลน้ำได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากน้ำที่ใสหมักจะกลายเป็นน้ำปูนหรือสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นการเปลี่ยนน้ำที่หมักจึงเป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนสุกมากขึ้น เป็นผลให้แคลเซียมออกไซด์เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นด้วย

นอกจากนี้ต้องรักษาระดับน้ำที่ใสหมักอยู่เหนือระดับของปูนขาวเสมอ เพื่อป้องกันไม่ให้ปูนขาวได้สัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเมื่อนำไปใช้ก่อหรือฉาบแล้วปูนที่เปลี่ยนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตแล้ว ไม่อาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีก ทำให้ปูนก่อและปูนฉาบไม่แข็งแรงเท่าที่ควรและจะแตกกะเทาะออกได้ง่ายในภายหลัง

สำหรับวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นมวลสารเพิ่มความแข็งแรงหรือทรายนั้น ให้เตรียมทรายจากน้ำจืดที่สะอาดไม่มีการเจือปนด้วยวัสดุอื่น ๆ ควรเป็นทรายที่แห้งสนิทและมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก

1) การก่อหรือฉาบ

ปูนขาวที่ผ่านการหมักจนสมควรแล้ว จะตกตะกอนอยู่ในบ่อหรือถังหมัก ให้ตวงขึ้นมาตามอัตราส่วนที่ต้องการใช้ วิธีการตวงให้ได้เนื้อปูนโดยไม่มีน้ำปูนซึ่งอยู่ผิวหน้าของปูนที่หมักในน้ำผสมด้วยนั้น ให้ตวงน้ำปูนออกก่อนแล้วจึงตวงเนื้อปูนขึ้นมา น้ำปูนส่วนนี้ช่างไทยมักใช้ในการพรมบนผิวงานเพื่อหน่วงการแห้งของปูนให้ช้าลง ทั้งยังมีรายงานการศึกษาพบว่า การพรมน้ำปูนบนผิวปูนลดปัญหาการแตกปริของงานและจะช่วยทำให้ปูนที่ก่อหรือฉาบแข็งแรงขึ้น (Bennett and Speweik, 2002) สำหรับเนื้อปูนที่ได้นั้นจะนำไปผสมกับทรายให้เข้ากันแล้วจึงนำไปก่อหรือฉาบตามวัตถุประสงค์ของงาน

2) การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

เมื่อก่อหรือฉาบตามวัตถุประสงค์ของงานแล้ว หลังจากนั้นทิ้งไว้ภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ เพื่อให้ปูนหมักที่นำมาผสมกับทรายได้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจนกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างสมบูรณ์

กระบวนการตั้งแต่เผาหินปูนในอุณหภูมิสูงจนได้ปูนสุก การหมักปูนสุกในน้ำ ผสมปูนกับทรายเพื่อขึ้นรูปเป็นงานก่อหรือฉาบ และเกิดการเปลี่ยนเป็นหินปูนอีกครั้งหนึ่งนั้น แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 กระบวนการเกิดปูนขาว

| กระบวนการ | วัสดุตั้งต้น - ผลิตภัณฑ์ | ปฏิกิริยาเคมี |
|-----------|---------------------------------------|--|
| Burning | Limestone - Quick lime | $\text{CaCO}_3 + \text{Heat} \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ |
| Slaking | Quick lime - Slaked lime (lime putty) | $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca(OH)}_2$ |
| Hardening | Slaked lime - Limestone | $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ |

2.1.3 งานศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบ

ศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบนั้น ไม่มีหลักฐานเป็นลายลักษณ์อักษรปรากฏแน่ชัดว่าชาติใดเป็นชาติที่ริเริ่มขึ้น มีเพียงหลักฐานจากแหล่งโบราณคดีเท่านั้นที่แสดงว่าชนชาติตุรกี เป็นชนชาติแรกที่น่าปูนขาวมาสร้างเป็นปูนก่อ และปูนฉาบและการใช้ปูนขาวมาเป็นปูนก่อหรือปูนฉาบก็แพร่หลายทั่วไปทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่

- 1) ความสามารถในการใช้งาน (Workability) สูง
- 2) มีสภาพค้าง (Retentivity) ของน้ำสูงมาก
- 3) สภาพการเชื่อมประสาน (Adhesion) เนื่องานสูง
- 4) สภาพความยืดหยุ่น (Plasticity) สูง
- 5) ความแข็งแรง (Strength) ต่ำกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland cement)
- 6) มีความคงทนต่อการใช้งาน (Durability) สูง
- 7) น้ำที่แทรกซึมในเนื่องานสามารถระเหยออกได้ หรืออยู่ในสภาพ “ หายใจได้” (Nicholson, 1987)
- 8) ความเป็นฉนวนสูง สภาพนำไฟฟ้าต่ำ
- 9) ความคงทนต่อแรงอัด (Compressive strength) ของปูนก่อและปูนฉาบซึ่งอัตราส่วนระหว่างปูนขาวต่อทรายเท่ากับ 1 : 3 ในระยะเวลา 6 เดือน มีค่า 7 MN/m² (Eldridge, 1974)

สำหรับในประเทศไทยนั้น การใช้ปูนก่อและปูนฉาบในศิลปกรรมโบราณสถานต่าง ๆ นั้น จำแนกได้ตามลักษณะสถาปัตยกรรมในประเทศไทย 5 ยุคสมัย (กิจจา อยู่โพธิ์, สัมภาษณ์, 24 มกราคม 2544) ดังนี้

2.1.3.1 สถาปัตยกรรมขอม

การก่ออิฐในโบราณสถานประเภทนี้ มีรายงานการศึกษาว่าเป็นการก่อแบบเนบสนิท ไม่พบร่องรอยของปูนก่อ แต่ลักษณะภายนอกจะฉาบด้วยปูนฉาบทับ โดยเป็นการฉาบค่อนข้างบางด้วยปูนขาวที่มีความละเอียดสูง ลักษณะการก่อและฉาบประเภทนี้สามารถพบได้ที่ ปราสาทศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์

2.1.3.2 สถาปัตยกรรมสุโขทัยตอนปลาย - อยุรยาตตอนต้น

หลักฐานจากโบราณสถานพบว่า ในยุคนี้มีการใช้วัสดุช่วยเชื่อมงานก่ออิฐ วัสดุดังกล่าว คือ ดินเหนียวผสมปูนขาว ที่เรียกว่า “ดินสอหรือดินก่อ” งานก่อจึงมีความมั่นคงแข็งแรงมากขึ้น สำหรับภายนอกนั้นยังคงฉาบด้วยปูนขาว เช่นเดียวกับสถาปัตยกรรมขอม

2.1.3.3 สถาปัตยกรรมอยุธยา

ยุคนี้มีการพัฒนาจากการใช้สอดดินในยุคที่สอง มาเป็นสอปูนหรือการก่อด้วยปูนขาว ซึ่งจะก่อเป็นชั้นๆ โดยที่ภายในสถาปัตยกรรมแบบนี้จะยังคงอัดด้วยดิน ส่วนภายนอกนั้นจะฉาบด้วยปูนขาวเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของอิฐ พบว่าเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพจากสภาวะแวดล้อม ปูนฉาบจะกะเทาะก่อน จากนั้นปูนขาวที่ใช้สอดหรือก่อจะเสื่อมสภาพตาม และสุดท้ายจะเป็นการเสื่อมสภาพของดินที่อัดไว้ภายใน

นอกจากนี้ในยุคนี้จะพบว่าที่ชั้นของปูนฉาบภายนอก ช่วงไทยนิยมประดับตกแต่งด้วยปูนปั้นเป็นลวดลายต่าง ๆ เพื่อความสวยงาม นอกเหนือจากการฉาบปูนเพื่อปกป้องอิฐและถ่ายน้ำหนักจากส่วนบนสู่ฐานเช่นเดิม

2.1.3.4 สถาปัตยกรรมอยุธยาตอนปลาย - รัตนโกสินทร์ตอนต้น

ยุคนี้การใช้ปูนขาวจะพัฒนาขึ้น โดยพบว่าใช้อิฐก่อหรือสอดด้วยปูนขาว สำหรับดินที่ใช้อัดภายในตามเดิมนั้น เปลี่ยนเป็นการใช้ทรายแทนดินเหนียวในบางส่วน และใช้ปูนขาวผสมทรายฉาบภายนอก ดังนั้นสถาปัตยกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบใน

ยุคนี้จะมีความแข็งแกร่งมากขึ้นกว่าเดิม เช่น องค์เจดีย์ วัดกุฎีดาว สันนิษฐานว่าปูนขาวที่นำมาใช้ในยุคสมัยนี้ จะมีการใช้เทคโนโลยีจากชาติตะวันตกที่เข้ามาติดต่อ

2.1.3.4 สถาปัตยกรรมรัตนโกสินทร์

ร้อยกว่าปีที่ผ่านมานี้ เป็นช่วงที่พบว่ามีการพัฒนาโครงสร้างจากการใช้ปูนขาวเป็นปูนก่อ เป็นการใช้อูนิเมนต์แทน โดยนำเทคโนโลยีจากตะวันตกเข้ามาใช้ เช่น อาคารเดิมที่ศได้ เรือนเจ้าพระยาธรรมาธิเบศน์ ภายหลังมีการศึกษาพบว่าการสร้างด้วยปูนซีเมนต์นั้น ระยะแรกความคงทนจะสูง แต่ในระยะยาวแล้วอายุการใช้งานจะสั้นกว่าปูนขาวมาก ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีเกลือสูง เกลื่อนี้จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพในภายหลัง

จวบจนปัจจุบัน การใช้ปูนขาวเพื่อเป็นปูนก่อและปูนฉาบเพื่อสร้างเป็นโบราณสถานนั้นลดน้อยลงไปมาก เนื่องจากการใช้ปูนขาวต้องใช้เวลาจากทั้งจากกระบวนการเตรียม การหมัก การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ รวมทั้งปัจจัยทางเศรษฐกิจ ดังนั้นการใช้ปูนขาวจึงเป็นไปเพื่อการบูรณะปฏิสังขรณ์ศิลปกรรมโบราณเป็นส่วนใหญ่

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปัจจุบันประเทศไทยจะไม่มีการพัฒนาการใช้ปูนขาว แต่พบว่าหลายประเทศทางตะวันตกหลายประเทศ เช่น ฝรั่งเศส อิตาลี ฯลฯ ยังคงมีการพัฒนาการใช้ปูนขาวอย่างต่อเนื่อง

2.2 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพ ของปูนก่อและปูนฉาบ

แม้ว่าปูนก่อและปูนฉาบที่สร้างจากปูนขาวกับทรายนั้นจะมีความแข็งแรงคงทน แต่ก็มี ความคงทนในระดับหนึ่งเท่านั้น ปูนก่อและปูนฉาบที่ถูกสร้างมาเป็นเวลาที่ยาวนานย่อม จะเกิดการเสื่อมสภาพ การเสื่อมสภาพดังกล่าวเกิดจากสาเหตุทางสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ ซึ่ง สิ่งแวดล้อมจะก่อการเสื่อมสภาพทั้งในลักษณะการเสื่อมสภาพทางกายภาพ (Physical weathering) และการเสื่อมสภาพทางเคมี (Chemical weathering)

2.2.1 สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ

สภาพแวดล้อมทางธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงไปนับจากอดีตสู่ปัจจุบัน จากอดีตที่มลภาวะน้อยสู่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมสืบต่อมายังยุคโลกาภิวัตน์ในปัจจุบัน ที่รวมปัญหามลภาวะทั้งด้านอากาศ น้ำ ดิน ฯลฯ มลภาวะที่เกิดขึ้นนอกจากจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์แล้ว ยังส่งผลกระทบต่อศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบ ดังนี้

2.2.1.1 น้ำ

น้ำทั้งจากบนดิน อันได้แก่ น้ำฝน น้ำค้าง หมอก ไอน้ำในบรรยากาศ รวมทั้งน้ำใต้ดิน จากแหล่งน้ำ น้ำบาดาล น้ำจากระบบชลประทาน อุทกภัย ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบเป็นอย่างมาก เนื่องจากเหตุผลดังนี้

1) น้ำใต้ดิน

เนื่องจากปูนก่อและปูนฉาบ เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอนเนตซึ่งหมู่คาร์บอนเนตนั้นมีอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนเป็นหลัก สร้างพันธะกันด้วยมุมพันธะเท่ากับ 105 องศา อะตอมของออกซิเจนมีค่าสภาพไฟฟ้าลบ (Electronegativity) สูง จึงพยายามดึงธาตุนั้นที่มีค่าสภาพไฟฟ้าลบมาสู่อะตอมออกซิเจนนั้นและเมื่อออกซิเจนเกิดการรวมตัวกับอะตอมไฮโดรเจนเพื่อเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, OH⁻)

ดังนั้นจึงเกิดคุณสมบัติความมีขั้ว (Polarity) ที่อะตอมของออกซิเจนหรือไฮโดรเจน เรียกว่า ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) แสดงคุณสมบัติในการดึงโมเลกุลของน้ำใต้ดิน น้ำจึงถูกลำเลียงสู่เนื้อปูนก่อและปูนฉาบด้วยแรงการซึมตามรูเล็ก (Capillary force) สามารถวัดได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมด้วยแรงการซึมตามรูเล็ก (Capillary absorption coefficients, CA /g.cm⁻².s^{-1/2}) เข้าสู่รูพรุนในเนื้อปูน ซึ่งพบว่ายิ่งขนาดความพรุนในเนื้อปูนเล็ก แรงการซึมตามรูเล็กจะยิ่งมากและแรงนี้สามารถลำเลียงน้ำสูงขึ้นไปได้หลายเมตร ถ้าไม่ถูกต้านด้วยแรงประเภทอื่น ดังนั้นในศิลปกรรมประเภทที่ก่อสร้างจากวัสดุที่มีเนื้อละเอียด ขนาดของรูพรุนเล็ก เช่น ปูนขาว อิฐ ดินเหนียว ฯลฯ จะเกิดแรงดึงดังกล่าวขึ้นสูงเนื่องานได้ดีกว่าวัสดุที่มีเนื้อหยาบ

อย่างไรก็ตามรายงานการศึกษายังพบว่าอัตราส่วนของทรายต่อปูนขาวที่ใช้สำหรับปูนก่อและปูนฉาบนั้น มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมด้วยแรงการซึมตามรูเล็ก (Capillary absorption coefficients) ดังตารางที่ 2.2 ([www. arcadiaricerche. it / indici % 20libri / abstracts % 2020000. htm](http://www.arcadiaricerche.it/indici%20libri/abstracts%2020000.htm), 2002)

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมด้วยแรงการซึมตามรูเล็ก (ค่าความผิดพลาด $\pm 10\%$.)

| อัตราส่วนระหว่างปูนขาวต่อทราย | CA ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$) |
|-------------------------------|--|
| 1 : 2 | 0.56 |
| 1 : 3 | 0.48 |
| 1 : 8 | 0.64 |
| 1 : 10 | 0.72 |

ภาวะที่น้ำใต้ดินซึมขึ้นสู่ปูนตามกระบวนการดังกล่าวข้างต้นนั้น จะไม่เป็นปัญหามากนัก ถ้าน้ำนั้นเป็นน้ำที่ไม่เจือปนสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์อื่นใด เพราะเมื่อปูนได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ น้ำจะสามารถระเหยออกไปได้โดยไม่ทิ้งสารใดตกค้างให้เป็นปัญหา แต่จากการศึกษาพบว่าน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ดี สามารถละลายอินทรีย์สารได้เกือบทุกชนิด น้ำใต้ดินจึงสามารถละลายเกลือละลายน้ำ (Soluble salts) หลายประเภท ได้แก่

เกลือในกลุ่มซัลเฟต เช่น แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

เกลือในกลุ่มคลอไรด์ เช่น แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ฯลฯ

เกลือชนิดต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำใต้ดิน เป็นเกลือในสภาพของสารละลายสามารถแทรกซึมตามเนื้อปูนจนกระทั่งที่ระดับความสูงหนึ่ง ถ้าบรรยากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและอุณหภูมิสูงจะทำให้โมเลกุลของน้ำในสารละลายเกลือที่อยู่ใกล้ผิวปูนระเหยออกไป (Evaporation zone) อย่างรวดเร็วทำให้เกิดผลึกเกลือที่ผิวปูน ปรากฏการณ์ลักษณะนี้เรียกว่า Efflorescence

สำหรับการตกผลึกภายในเนื้อปูนนั้นจะเกิดเมื่ออุณหภูมิภายนอกสูงหรือความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ความร้อนจากดวงอาทิตย์และกระแสลมช่วยพัดพาความชื้นทำให้ผิวปูนแห้งแต่เนื้อปูนภายในยังเปียกชื้น ทำให้เนื้อปูนภายในเกิดการเสื่อมสภาพ ปรากฏการณ์ลักษณะนี้ เรียกว่า Cryptoflorescence

อนึ่ง พบว่าการเสื่อมสภาพจะเกิดมากขึ้นถ้ามีน้ำที่แทรกซึมในปูนนั้นเป็นสารละลายของเกลือต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้ว เนื่องจากสารละลายเกลือที่แทรกซึมสู่เนื้อปูนด้วยแรงซึมผ่านตามรูเล็ก (Capillary force) นั้นจะแทรกซึมไปได้ในระดับความสูงหนึ่ง ที่ระดับความสูงนั้น ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะก่อให้เกิดการระเหยของโมเลกุลน้ำจากสารละลายเกลือ เมื่อโมเลกุลน้ำระเหยออกไป เกลือที่เหลืออยู่จะตกผลึกสะสมและมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเกลือทั้งที่ตกผลึกอยู่ในเนื้อปูนและผิวปูน จะเกิดแรงดันใน 2 ลักษณะได้แก่ (จิราภรณ์ อรัณยะนาค, 2538)

- 1) เกลือที่เกิดจากอุณหภูมิสูง เมื่อสูญเสียน้ำไปจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น
- 2) เกลือที่เกิดจากอุณหภูมิต่ำ จะควบแน่นเข้าไปในผลึกเกลือที่มีน้ำผลึก (Hydrated crystal) เมื่ออุณหภูมิสูงน้ำในเกลือนั้นจะระเหยออกมาเป็นเกลือที่ปราศจากน้ำผลึก (Anhydrous crystal) ซึ่งมีขนาดเล็กลง พบว่าปริมาณของเกลือที่มีน้ำผลึกกับเกลือที่ปราศจากน้ำผลึกนั้นมีปริมาณที่ต่างกันมาก เช่น เกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ปราศจากน้ำผลึกมีปริมาณต่างจากเกลือที่มีน้ำผลึก ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) ถึงร้อยละ 308 หรือ เกลือแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ที่ปราศจากน้ำผลึกมีปริมาณต่างจากเกลือที่มีน้ำผลึก ($\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) ร้อยละ 170

แรงดันที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้ปูนก่อและปูนฉาบเกิดการร้าว เป็นผลจากการเสื่อมสภาพจากเกลือ แสดงได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบจากสารละลายเกลือ

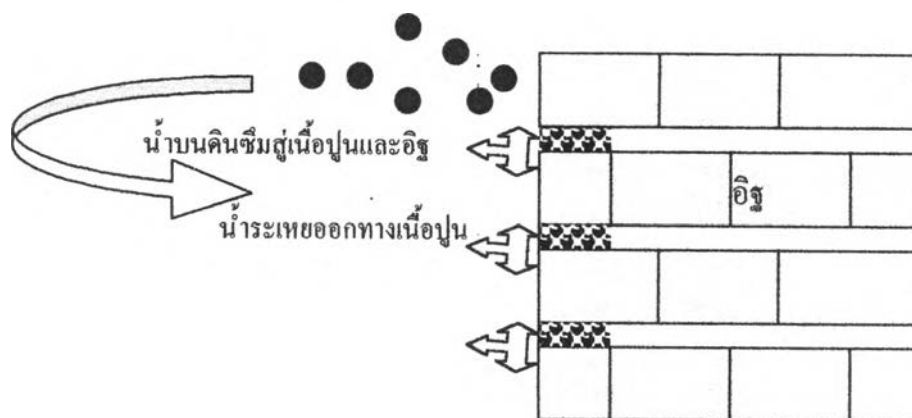
อย่างไรก็ตามการผุพังยังขึ้นกับระดับน้ำใต้ดิน ฤดูกาล ลักษณะความพรุนของเนื้อปูน ลักษณะวัสดุของศิลปกรรมที่ปลูกสร้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศอีกเป็นสำคัญ กล่าวคือ โบราณสถานที่อยู่ใกล้กับแม่น้ำ ลำคลอง ระดับน้ำใต้ดินจะสูงน้ำจะสามารถซึมสู่ผิวปูนจะมากกว่า โบราณสถานที่อยู่ไกลแหล่งน้ำและระดับน้ำจะเพิ่มสูงมากขึ้นในฤดูฝนมากกว่าฤดูแล้ง

ความผุพังยังเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่มีผิวละเอียดมากกว่าผิวหยาบ เนื่องจากแรงดึงจากรูพรุนขนาดเล็กที่มากกว่า แต่ต้องคำนึงถึงอัตราการระเหยของพื้นผิวด้วย โดยการระเหยจะเกิดบริเวณวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำเช่นปูนก่อและปูนฉาบได้ดีกว่าอิฐ หิน ซีเมนต์ กระเบื้องประดับ ฯลฯ และจะพบว่าในบริเวณที่มีการระเหยในอัตราที่สูงกว่าจะมีการสะสมของเกลือมากกว่าบริเวณที่มีอัตราการระเหยต่ำ จึงเสื่อมสภาพได้เร็วกว่า สำหรับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศนั้นจะทำให้ลักษณะของการผุพังต่างกันไปตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

2) น้ำบนดิน

ไม่เฉพาะน้ำใต้ดินเท่านั้นที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบ น้ำจากบรรยากาศ เช่น น้ำฝน น้ำค้าง หมอก ฯลฯ ก็สามารถก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบได้เช่นกัน ดังกรณีที่พบว่าบริเวณที่เป็นทางที่น้ำฝนไหลผ่าน จะเกิดรอยแตกได้ชัดเจนกว่าบริเวณอื่น หรือบางกรณีการที่น้ำบนดินแทรกซึมเข้าสู่เนื้อปูนแล้วระเหยออกไปก็ เป็นปัญหาทำให้เนื้อปูนเสื่อมสภาพได้เช่นกัน ลักษณะที่เกิดขึ้นเป็นดังภาพที่ 2.5

โมเลกุลน้ำที่แทรกซึมเข้ามาจะทำให้เนื้อปูนภายในชุ่มไปด้วยน้ำ ขณะที่ผิวภายนอกของปูนได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ และลมช่วยพัดพาให้โมเลกุลน้ำผิวนอกระเหยได้ดีกว่าภายใน ผิวภายนอกจึงแห้งกว่าทำให้ผิวปูนภายนอกเกิดการหดตัว ขณะที่เนื้อปูนภายในยึดขยายเนื่องจากความชื้น การยึดและหดตัวสลับกันนี้เป็นเหตุให้ผิวหน้าของปูนก่อและปูนฉาบแตก ขณะที่เนื้อปูนภายในเปื่อยยุ่ยและเสื่อมสภาพลง



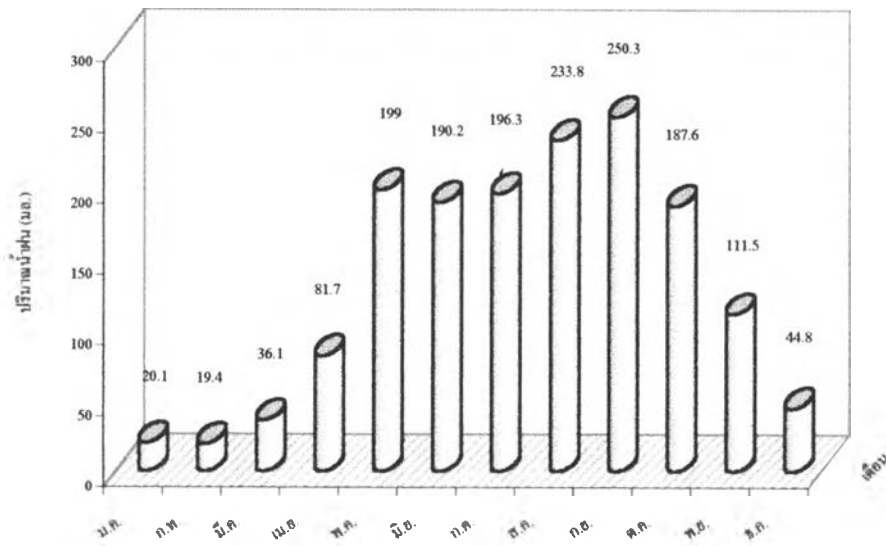
ภาพที่ 2.5 ลักษณะการซึมผ่านความชื้นของน้ำบนดิน

นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำบนดิน เช่น หมอก ละออง โมเลกุลของน้ำในอากาศ (Aerosol) สามารถเข้าไปสู่เนื้องปุ่น โดยการกลั่นตัว (Condensation) การกลั่นตัวนี้เกิดขึ้นเมื่อบรรยากาศภายนอกเย็นและอุณหภูมิของปูนขณะนั้นต่ำกว่าจุดน้ำค้าง (Dew point) ของอากาศ ขณะนั้น น้ำจากการ กลั่นตัวจะรวมเอาปริมาณอากาศจำนวนมากที่อยู่บริเวณผิวหน้าของปูนนั้น เรียกว่า “ปรากฏการณ์ของสเตฟาน” (Stefan effect) และเกิดการละลายฝุ่นละออง สิ่งสกปรก ก๊าซต่าง ๆ ที่เกาะบริเวณปูนก่อและปูนฉาบในลักษณะการตกสะสมแบบแห้ง (Dry deposit) นั้น เปลี่ยนสภาพเป็นการตกสะสมแบบเปียก (Wet deposit)

เนื่องจากน้ำได้ละลายฝุ่นละออง สิ่งสกปรก หรือก๊าซนั้นๆ เมื่อน้ำจากการกลั่นตัวระเหยจะทิ้งคราบจากสิ่งต่าง ๆ ดังกล่าวไว้ บางกรณีน้ำอาจทำปฏิกิริยากับสารที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต เกิดเป็นน้ำที่มีสภาพกรดหรือด่าง เช่น กรดออกซาลิก (HOOC - COOH) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) สารประกอบไนเตรท (NO_3^-) ซัลไฟด์ (S^{2-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) หรือฟอสเฟต (PO_4^{3-}) (จิราภรณ์ อรัณยะนาค, 2544) ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบ

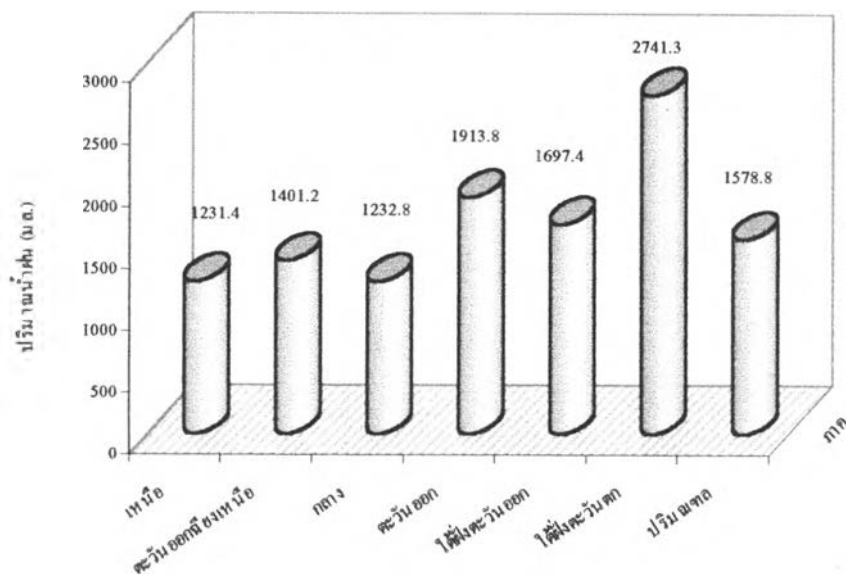
อย่างไรก็ตามพบว่าถ้าเกิดการละลายของเกลือโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl_{(aq)}$) ฝุ่นกระจายในรูปของละอองโมเลกุลน้ำทะเลแล้วจะสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวปูน โดยที่อุณหภูมิของปูนไม่ต้องต่ำกว่าจุดน้ำค้างได้ ปูนก่อหรือปูนฉาบบริเวณใกล้ทะเลจึงเกิดปัญหาในส่วนนี้มาก

น้ำจึงเป็นปัญหาสำคัญมากที่สร้างความเสียหายต่อศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบ โดยเฉพาะในประเทศไทยซึ่งมีภูมิอากาศร้อนชื้นแถบศูนย์สูตร ซึ่งมีฝนตกอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี ดังรายงานของกรมอุตุนิยมวิทยาว่าด้วยปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยของเดือนต่างๆ ในรอบปี แสดงได้ดังภาพที่ 2.6

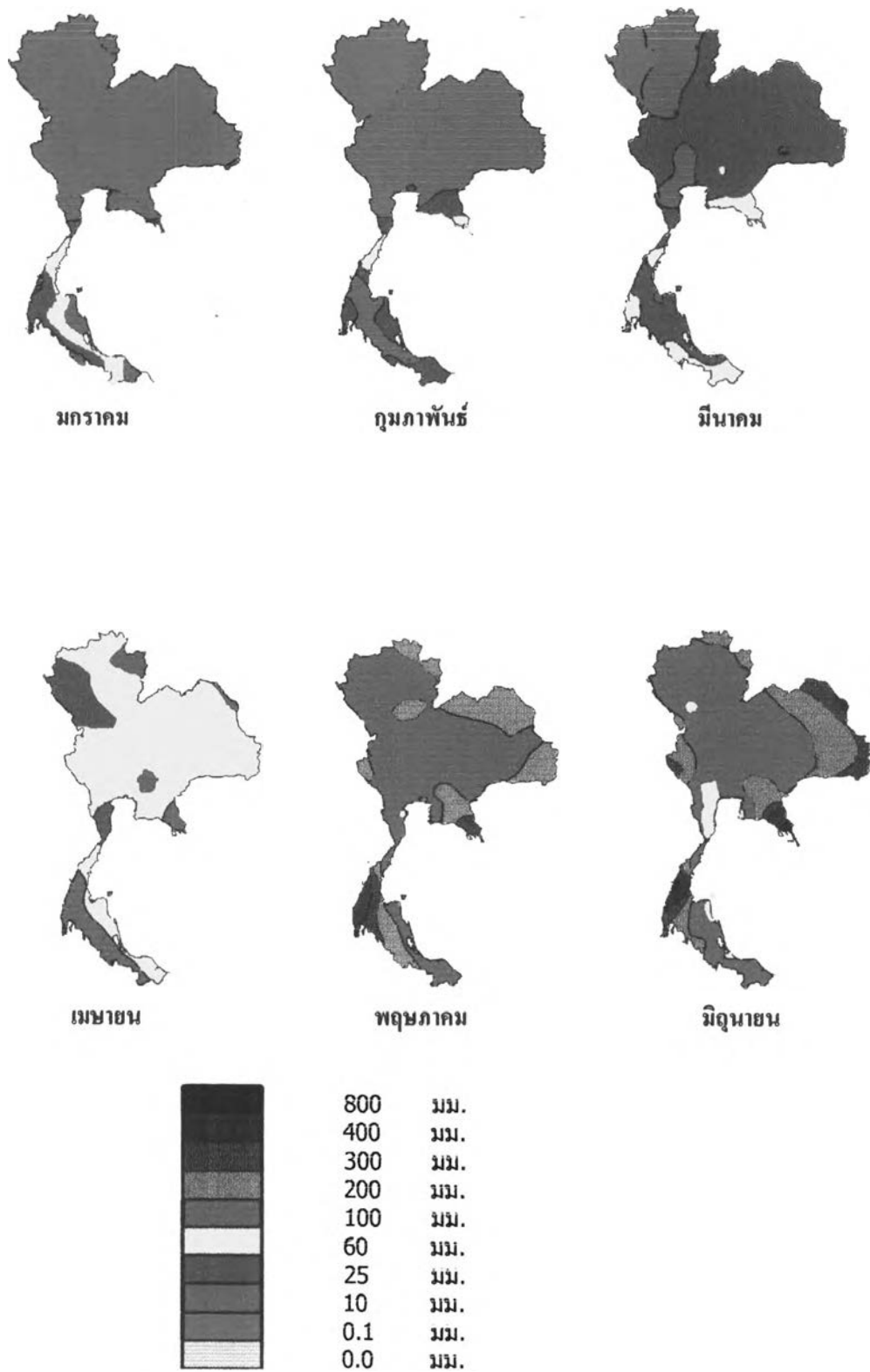


ภาพที่ 2.6 ปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยแต่ละเดือนของประเทศไทยในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2504 - 2533)

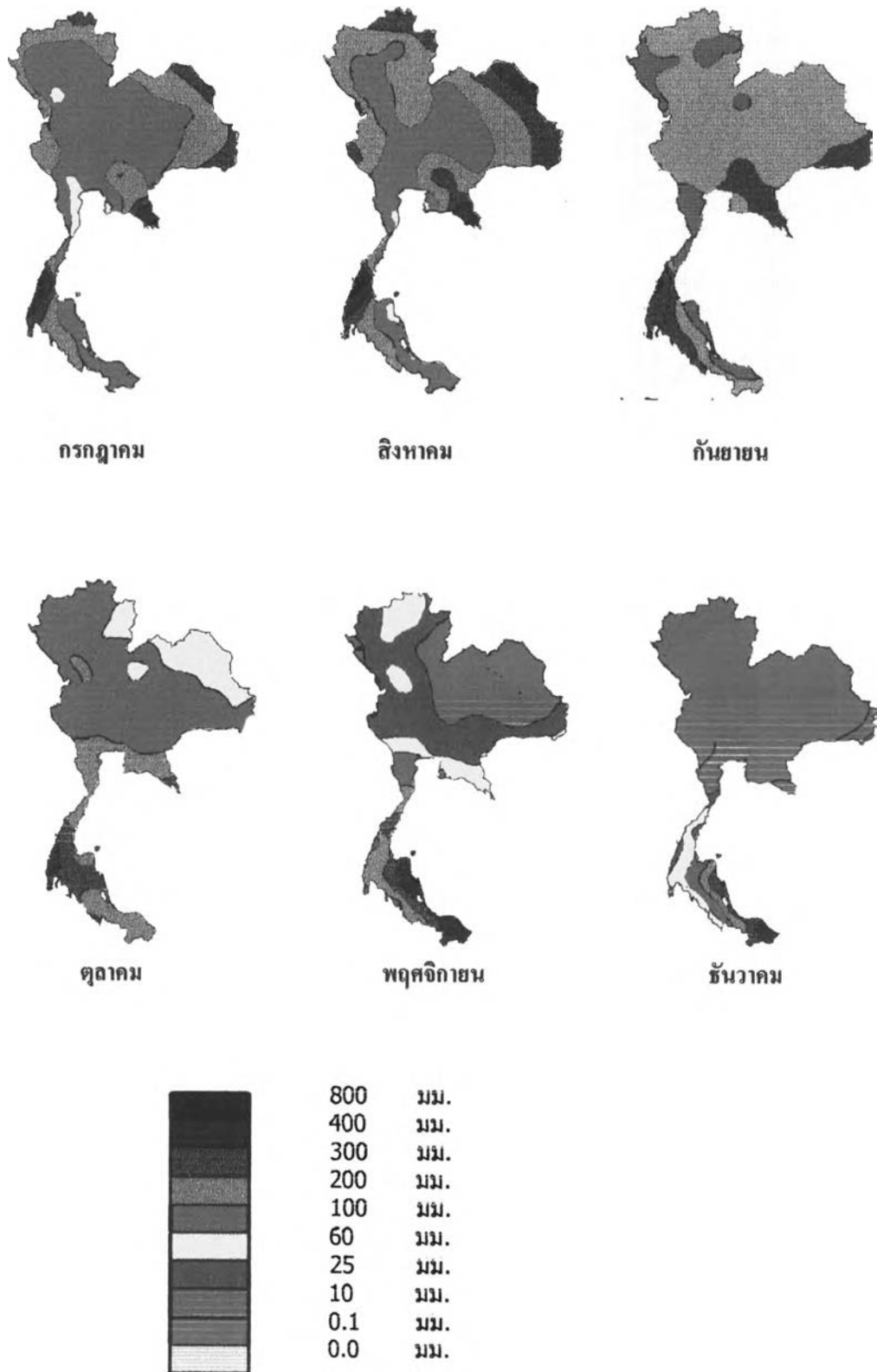
จากภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าไม่เฉพาะฤดูฝนเท่านั้น แต่ในทุก ๆ เดือนของประเทศไทยมีฝนตกตลอดทั้งปี รายงานปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดในภาค ในจังหวัดต่าง ๆ รวมทั้งค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนของประเทศไทยในรอบ 30 ปี แสดงได้ดังภาพที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



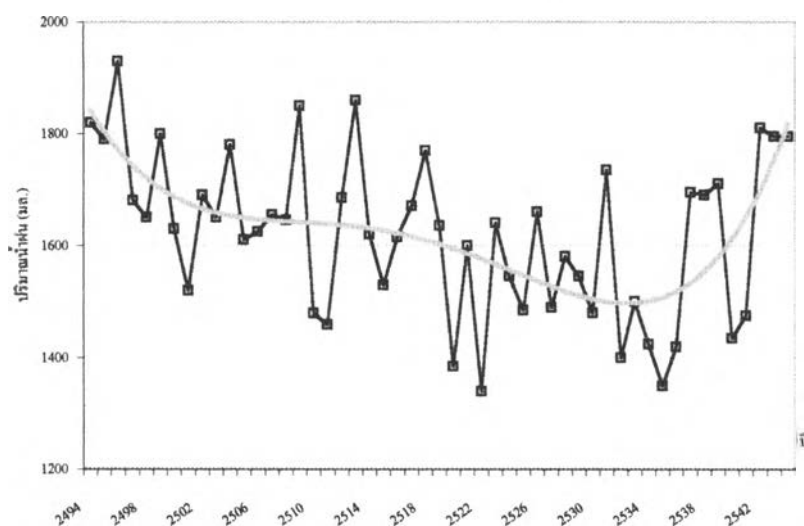
ภาพที่ 2.7 ปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยแต่ละภาคของประเทศไทยในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2504 - 2533)



ภาพที่ 2.8 ปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยแต่ละเดือนของจังหวัดในประเทศไทยในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2504 - 2533)



ภาพที่ 2.8 ปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยแต่ละเดือนของจังหวัดในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2504 - 2533) (ต่อ)



ภาพที่ 2.9 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนของประเทศไทยในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2504 - 2533)

จากการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนทั่วประเทศทั้งที่พิจารณารายภาคและรายจังหวัด นั้น พบว่าฝนตกในทุก ๆ พื้นที่ของประเทศไทย ศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบในทุก ๆ แหล่งจึงมีโอกาสเสื่อมสภาพจากการซึมผ่านความชื้นของน้ำฝนหรือน้ำบนดิน อีกทั้งน้ำฝนยังเป็นที่มาของแหล่งน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำธรรมชาติต่าง ๆ อุทกภัย ฯลฯ โดยปริมาณของน้ำใต้ดินจะแปรผันตามกับปริมาณน้ำฝน ในช่วงที่มีฝนตกชุก ระดับน้ำใต้ดินก็จะสูงขึ้น และถึงแม้ไม่มีฝนตก ระดับใต้ดินก็ยังคงอยู่เพียงแต่ลดระดับเท่านั้น การแทรกซึมของน้ำสู่ปูนก่อและปูนฉาบจึงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและส่งผลให้การเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบเกิดขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นน้ำจึงเป็นสิ่งแวดล้อมทางกายภาพที่สำคัญมากต่อการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบ

2.2.1.2 ลม

ลมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบ ซึ่งมักเป็นการเสื่อมสภาพทั้งในลักษณะกายภาพ (Physical weathering) เนื่องจากลมสามารถพาวัตถุมวลเบา เช่น ทรายไปสู่ศิลปกรรม และเนื่องจากทรายมีอำนาจในการขัดสี จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการสึกกร่อนของปูนก่อหรือปูนฉาบ โดยเฉพาะในด้านที่มีการปะทะของลมสูง ทั้งยังพบด้วยว่าปรากฏการณ์वादภัยทำให้เกิดการแตก หักหรือโค่นของศิลปกรรมปูนก่อและปูนฉาบ เกิดความเสียหาย โดยเฉพาะบริเวณยอดมณฑป เจดีย์ และ ปรางค์

นอกจากนี้ลมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้กระบวนการตกผลึกใต้พื้นผิวปูนเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากลมเร่งให้น้ำระเหยจากปูนเร็วขึ้น น้ำที่ละลายเกลือมาสู่ผิวปูนนั้นจะระเหยสู่บรรยากาศ ขณะที่เกลือไม่สามารถระเหยได้เกิดสะสมที่ผิวปูนนั้นการระเหยที่เร็วจึงเป็นเหตุให้ การสะสมของเกลือที่ปูนเร็วขึ้นและเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลึกของเกลือเกิดการอึดตัวเร็วขึ้นจนเกิดการดันตัวให้ผิวปูนผุพัง

ลมยังสามารถเป็นสื่อที่นำพาเกลือในบรรยากาศ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ชายฝั่ง ทะเลสู่โบราณสถานใกล้เคียง ก่อให้เกิดปัญหาต่อปูนก่อ หรือปูนฉาบในโบราณสถานนั้นๆ ได้เช่นกัน

2.2.1.3 แสงแดด

แสงแดดเป็นแสงจากธรรมชาติที่มีทั้งความร้อนจากรังสีอินฟราเรด (Infrared , IR) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพของปูนก่อปูนฉาบ ทั้งนี้เนื่องจากแสงอาทิตย์ให้ความร้อนและเร่งให้เกิดการระเหยของโมเลกุลน้ำเกิดขึ้น แต่การระเหยที่เร็วไปจะไม่เกิดผลดี เนื่องจากผิวภายนอกของปูนก่อและปูนฉาบจะแห้งเร็วกว่าภายในเนื้อปูน ผิวภายในจึงยังชุ่มไปด้วยน้ำ และเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพเนื่องจากผิวภายนอกหดตัวขณะที่ผิวภายในเนื้อปูนที่ชุ่มไปด้วยน้ำเกิดการขยายตัว เป็นปรากฏการณ์ Thermal gradient (จิราภรณ์ อรรถชยานุ, 2544) เกิดการเปื่อยยุ่ยผุพังดังที่กล่าวมาแล้ว การศึกษาวิจัยพบว่าในบริเวณที่ได้รับแสงแดดจะผุพังมากกว่าบริเวณที่ได้รับแสงแดดน้อยกว่า

2.2.2 สิ่งแวดล้อมทางชีวภาพ

ถึงแม้ว่าสาเหตุการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบในงานศิลปกรรมจะเกิดจากสาเหตุทางสิ่งแวดล้อมกายภาพเป็นส่วนใหญ่ ทว่าสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพ อันได้แก่สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ นั้น ก็ส่งผลกระทบต่อศิลปกรรมดังกล่าวทั้งทางตรงและทางอ้อมด้วย สาเหตุจากสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพนั้น มีดังต่อไปนี้

2.2.2.1 มนุษย์

มนุษย์มีความเกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพของศิลปกรรมปูนก่อและปูนฉาบ ตั้งแต่เริ่มต้น เนื่องจากมนุษย์เป็นผู้ก่อสร้างปูนก่อและปูนฉาบ กระบวนการผลิต การหมัก การก่อสร้างปูนก่อและปูนฉาบที่ผิดไปจากความถูกต้องเหมาะสม ล้วนทำให้เกิดปูนก่อและปูนฉาบที่มีคุณภาพและอายุการใช้งานที่สั้นกว่าปกติ เช่น การเผาปูนขาวด้วยอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม หินปูนซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นปูนขาวหรือแคลเซียมออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาอย่างไม่สมบูรณ์ เป็นปูนขาวคุณภาพต่ำ ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

นอกจากนี้การนำปูนขาวจากหินปูนโคโลไมท์มาใช้ ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบเสื่อมสภาพ เนื่องจากในขั้นตอนการเผาหินปูนโคโลไมท์นั้นจะเกิดแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) แมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลซัลเฟต (SO_4^{2-}) จากบรรยากาศหรือน้ำใต้ดิน เปลี่ยนเป็นเกลือแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) กับความชื้นหรือน้ำได้ 7 โมเลกุล ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นและเกิดแรงดันปูนก่อและปูนฉาบในศิลปกรรมให้เสื่อมสภาพได้ (จิราภรณ์ อรรถชยานุช, สัมภาษณ์, 5 เมษายน 2545)

กิจกรรมของมนุษย์ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโบราณสถานก่อสร้างจากปูนก่อและปูนฉาบ เช่น การทำนาเกลือ การแก้ปัญหาดินเปรี้ยวด้วยการเติมเกลือยิปซัม เกษตรกรรมที่ใช้ยาปราบวัชพืช ยาฆ่าแมลง ปุ๋ย และจากกระบวนการสร้างและสลาย (Metabolism) ของมนุษย์ กิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดเกลือที่เป็นปัญหาต่อปูนก่อและปูนฉาบต่อไปได้

ความเสียหายยังเกิดจากการลักลอบเข้าไปขุดทำลายโบราณสถานเพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์เฉพาะกลุ่มคน นอกจากนี้ความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ก็พบว่าทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบ ความมั่งง่ายไม่รู้คุณค่าของนักท่องเที่ยว แรงสั่นสะเทือนจากการคมนาคม การซ่อมแซมที่ไม่ถูกต้องวิธี เช่น การใช้ซีเมนต์โบกทับเพื่อปฏิสังขรณ์ศิลปกรรม

2.2.2.2 พืชและจุลินทรีย์

พืชที่มีอิทธิพลสร้างความเสียหายให้กับโบราณสถานที่สร้างมาจากปูนก่อ และปูนฉาบนั้น หมายรวมถึงพืชชั้นต่ำ เช่น มอส เฟิร์น ดินตุ๊กแก ลิเวอร์เวิร์ท สาหร่าย (ตะไคร่น้ำ) ฯลฯ และพืชชั้นสูงทั้งพืชล้มลุกและพืชยืนต้น เช่น ผักโขม ผักบุ้ง ต้นลูกใต้ใบ หนุ่ยจรรยา หนุ่ยคา หนุ่ยขน ต้นโพธิ์ ต้นไทร ฯลฯ

วงจรชีวิตของพืชดังกล่าวนี้อาศัยการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งใช้น้ำ แสงและแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ โดยพบว่าที่บริเวณปลายรากพืชจะมีหมวกราก (Cap root) ตรงส่วนปลาย บริเวณนี้จะมีการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ที่ตรงข้ามกับเนื้อวัสดุก่อสร้างหรือปูนก่อและปูนฉาบเพื่อดูดซึมไปใช้ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง การแลกเปลี่ยนประจุที่เกิดขึ้นทำให้การเชื่อมโยงพันธะของปูนขาวลดความแข็งแรงทำให้ปูนก่อและปูนฉาบผุพังลง นอกจากนี้ยังพบว่าการหยั่งเส้นใย (Rhizoid) ของพืชชั้นต่ำหรือการหยั่งราก (Root) ของพืชชั้นสูงก็ส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนของเนื้อปูนได้เช่นกัน เหล่านี้เป็นกระบวนการเสื่อมสภาพโดยกระบวนการชีวภาพ (Biodeteriation)

นอกจากนี้ยังพบด้วยว่าเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำหลายชนิดเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปูนก่อและปูนฉาบเสื่อมสภาพ โดยพบว่า แบคทีเรียแอกติโนมัยซีดิส (Actinomycetes) และราบางชนิดจะหลั่งสารออกมาภายนอก สารดังกล่าวก่อให้เกิดคราบบนปูนก่อ ปูนฉาบ มีการสะสมความชื้นทำให้วัสดุเปื่อยยุ่ย ซ้ำรูดและกร่อนลง

นอกจากนี้ ไลเคนส์ และสาหร่าย สามารถผลิตสารมีคุณสมบัติเป็นกรดทั้งที่เป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดฟอร์มิก (HCOOH) กรดอะซิติก (CH₃COOH) ฯลฯ รวมทั้งกรดอนินทรีย์ เช่น กรดไนตริก (HNO₃) และกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) บางกรณีพบว่าสารที่ผลิตออกมานั้นมีคุณสมบัติเป็นสารเชิงซ้อนแบบคีเลต (Chelating agent) ซึ่งมีประจุลบ เช่น กรดออกซาลิก (HOOC - COOH) กรดกลูโคนิก [HOOC-(CH-OH)₄-COOH] สารเชิงซ้อนประเภทนี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับอนุโมลหรือสธ ประกอบที่มีประจุบวกของปูนก่อและปูนฉาบเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งอาจละลายน้ำ ตกผลึกหรือทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ต่อไป ทำให้ปูนก่อและปูนฉาบสึกกร่อนทีละน้อย

2.2.2.3 สัตว์

สิ่งมีชีวิตประเภทสัตว์ทั้งที่มีขนาดเล็ก เช่น แมลง ปลวก หอย และสัตว์ขนาดใหญ่ เช่น หนู นก ค้างคาว ฯลฯ ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบได้ทั้งสิ้น

สัตว์จำพวกนี้จะสามารถเข้าไปสร้างรัง ก่อโพรงเพื่ออาศัยที่โบราณสถานจากปูนได้ กัดแทะทำลายส่วนโครงสร้างบางส่วน เช่น ไม้ที่เป็นโครงสร้างเพื่อการถ่ายรับน้ำหนักของโบราณสถาน ทำให้ความมั่นคงลดน้อยลงและเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวต่อไปและเมื่อซากของสัตว์เหล่านี้ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้อินทรียสารเพิ่มมากขึ้น เอื้อผลทางอ้อมต่อการเจริญเติบโตของพืชอีกด้วย

นอกจากนี้ในสัตว์ปีก ประเภทค้างคาว รายงานการศึกษาพบว่าในมูลค้างคาวที่กินพืชเป็นอาหารมีไนโตรเจนร้อยละ 1.9 - 2 สำหรับมูลค้างคาวที่กินสัตว์เป็นอาหารจะมีไนโตรเจนร้อยละ 3 - 10 ในโตรเจนที่พบเป็นที่มาของเกลือโซเดียมไนเตรด (NaNO_3) และทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบ ลักษณะนี้พบได้ที่ มณฑลปัวคศรีชุม ตำบลเมืองเก่า อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย (จิราภรณ์ อรรถชยานุภาค, 2538)

2.3 การอนุรักษ์งานศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบ

การอนุรักษ์ หมายถึง การดูแล รักษา เพื่อให้คงคุณค่าไว้และให้หมายรวมถึง การป้องกัน การรักษา การสงวน การปฏิสังขรณ์ และการบูรณะด้วย (กระทรวงศึกษาธิการ, กรมศิลปากร, 2528)

การสงวนรักษา หมายถึง การดูแลรักษาไว้ตามสภาพของเดิมเท่าที่เป็นอยู่และป้องกันมิให้เสียหายต่อไป

การปฏิสังขรณ์ หมายถึง การทำให้กลับคืนสู่สภาพอย่างที่เคยเป็นมา

การบูรณะ หมายถึง การซ่อมแซมการปรับปรุง ให้มีรูปทรงลักษณะกลมกลืนเหมือนของเดิมมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ต้องแสดงถึงความแตกต่างของสิ่งที่มีอยู่เดิมและสิ่งที่ทำขึ้นมาใหม่

2.3.1 แนวทางการอนุรักษ์ศิลปกรรมปูนก่อและปูนฉาบ

ปัญหาการเสื่อมสภาพของศิลปกรรมต่างๆ ในประเทศไทยนั้น ไม่เฉพาะเพียงแต่ปูนก่อและปูนฉาบเท่านั้น หากแต่เป็นศิลปกรรมหลายๆประเภทที่เสื่อมสภาพลงไป เป็นปัญหาที่ต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายฝ่ายทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชน ตลอดจนความร่วมมือจากประชาชนผู้เป็นเจ้าของศิลปกรรมของชาตินั้น

และเนื่องจากเป็นความร่วมมือจากหลายฝ่ายในอันที่จะอนุรักษ์ศิลปกรรมดังกล่าวให้คงสภาพและคงคุณค่าดั้งเดิมให้มากที่สุด . แนวความคิดทางการอนุรักษ์จึงแยกออกไปเป็นหลายประการ . ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดแนวทางการอนุรักษ์ขึ้นมาจากหลักการอนุรักษ์สากลหลายครั้ง นับตั้งแต่เอเธนส์ชาเตอร์ (ค.ศ.1931) และอิตาเลียนชาเตอร์ (ค.ศ. 1932) ซึ่งมีการปรับปรุงเรื่อยมา เพื่อให้ได้แนวทางการอนุรักษ์ที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันและทันสมัยตามสถานการณ์ปัจจุบัน . แนวทางดังกล่าว คือ เวนิสชาเตอร์ (ค.ศ. 1964) ซึ่งใช้เป็นหลักเกณฑ์สากลว่าด้วยการอนุรักษ์โบราณสถานดังนี้คือ (สมชาติ จิงศิริอารักษ์, 2540)

- 1) เน้นความชัดเจนของความต่างระหว่างของเก่ากับส่วนที่ต่อเติม
- 2) ปฏิเสธการทำเทียม
- 3) จุดประสงค์ในการบูรณะ คือ การสงวนรักษาและแสดงให้เห็นความชัดเจนถึงคุณค่าทางสุนทรียภาพและประวัติศาสตร์ของโบราณสถาน โดยอยู่บนพื้นฐานของความเคารพในวัสดุดั้งเดิมและเอกสารที่เป็นของแท้
- 4) ให้หยุดการบูรณะเมื่อถึงจุดที่การเคาะเริ่มต้น
- 5) ให้ความเคารพในประวัติศาสตร์ข้อมูลทุกยุคของโบราณสถาน การประเมินค่าของส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องและตัดสินใจว่าสิ่งใดจะต้องถูกเอาออกไปนั้น จะมอบให้บุคคลใดบุคคลหนึ่งรับผิดชอบแต่ผู้เดียวไม่ได้

6) การบูรณะทุกครั้งจะต้องมีการค้นคว้าทางโบราณคดีและประวัติศาสตร์ก่อน และหลังการปฏิบัติงาน

7) งานบูรณะทุกชนิดให้หลีกเลี่ยงวิธี “สร้างรูปแบบ” โดยการตั้งข้อสมมติฐานแบบสมมุติขึ้นมาแบบหนึ่ง แล้วอ้างความเหมาะสมต่างๆ นานาที่ผู้เคยบูรณะเคยมีประสบการณ์มาแล้ว โดยที่ข้อมูลเหล่านั้นไม่ใช่ข้อมูลจริง เช่น ภาพเขียนหรือภาพถ่ายเป็นต้น

8) แนวความคิดในการเรียกโบราณสถานว่าเป็น Dead และ Living monuments จากการประชุมที่กรุงมาดริด ในปี ค.ศ. 1904 ถือว่าไม่ถูกต้อง เพราะแม้แต่ซากโบราณสถานก็เป็นสิ่งที่มีชีวิตและสามารถส่งผ่านข้อมูลต่างๆ ให้รับทราบกันได้

หลักเกณฑ์สากลดังกล่าวได้ถูกใช้เป็นมาตรฐานของวิธีการอนุรักษ์ ถึงแม้จะมีนักอนุรักษ์รุ่นต่อมาปรับแนวความคิดให้เป็นที่ยอมรับง่ายขึ้น แต่ก็ยังใช้หลักเกณฑ์สากลเวนิสชาเตอร์เป็นพื้นฐานของงานอนุรักษ์กระทั่งปัจจุบัน

และด้วยพื้นฐานของการอนุรักษ์ข้างต้นนั้นจึงเกิดแนวทางในการอนุรักษ์ศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบ 2 ประการ ได้แก่ การป้องกันและการบูรณะปฏิสังขรณ์ (กิจจาอยู่โพธิ์, สัมภาษณ์, 24 มกราคม 2544)

2.3.1.1 การป้องกัน

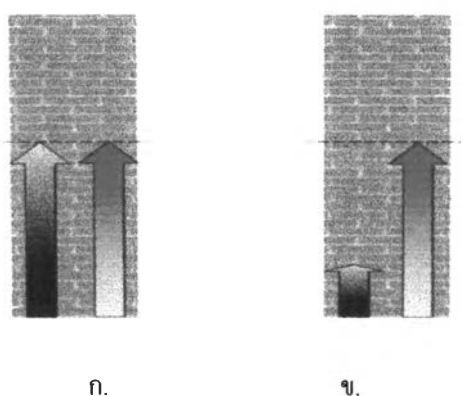
คือ การกระทำหรือกระบวนการในการใช้มาตรการต่างๆ ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดผลในการปกป้อง หรือคุ้มครองสภาพทางกายภาพของสถานที่ให้พ้นจากการเสื่อมสภาพผุพัง สูญหายหรือการถูกอันตรายโดยมีการสร้างสิ่งครอบคลุมหรือเกราะคุ้มกัน เพื่อป้องกันให้พ้นจากอันตรายและถูกทำอันตรายต่าง ๆ นั้น

การป้องกันด้านบนของศิลปกรรมปูนก่อและปูนฉาบนั้นจะสร้างหลังคาหรือสิ่งปกคลุมเพื่อป้องกันไม่ให้ปัจจัยภายนอก อันได้แก่ น้ำฝน แสงสว่าง ความร้อน ฯลฯ เข้ามามีอิทธิพลเร่งการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบ นอกจากนั้นยังมีการป้องกันผิวภายนอกของปูนก่อปูนฉาบโดยตรง ด้วยการเคลือบหรือทาสารเคมี สารกันน้ำ หรืออาจใช้วิธีการฉาบปูนฉาบเพื่อป้องกันปูนก่อดั้งเดิม

ในอดีตการป้องกันการเสื่อมสภาพบริเวณส่วนฐานนั้น ใช้วิธีการเปิดช่องความชื้นอาศัยหลักการที่ว่า น้ำหรือความชื้นจะพยายามระเหยออกจากบริเวณที่มีสภาพเอื้อต่อการระเหยมากที่สุดก่อนและน้ำหรือความชื้นดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะระเหยออกจากบริเวณที่ง่ายต่อการระเหยเท่า

นั่น ด้วยหลักการนี้จึงได้เปิดช่องระบายความชื้นเป็นทางเดียว อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่ใช่วิธีป้องกันการเสื่อมสภาพที่ดีที่สุด เพราะน้ำก็ยังคงเคลื่อนตัวขึ้นสู่ส่วนบนของผนังได้ตามแรงซึมผ่านตามรูเล็ก (Capillary force)

ปัจจุบันจะใช้วิธีการที่เรียกว่า “Damp proof course (DPC)” คือ การใช้แผ่นโลหะหรือวัสดุที่มีความแข็งแรง คงทนและไม่เกิดสนิม สอดเข้าไปยังผนังซึ่งจะรูปเป็นแนวเหนือพื้นดินหรืออาจใช้วิธีฉีคสารเคมีกันน้ำไปยังผนัง จุดประสงค์ของวิธีดังกล่าวก็เพื่อตัดเส้นทาง การลำเลียงขึ้นของน้ำที่เกิดจากแรงซึมผ่านตามรูเล็ก



ภาพที่ 2.10 Damp proof course (DPC)

ลักษณะการซึมของน้ำใต้ดินสู่ปูนก่อและปูนฉาบในสภาวะปกติ

ลักษณะการซึมของน้ำใต้ดินสู่ปูนก่อและปูนฉาบ เมื่อใช้ CPD

สำหรับกรณีที่โบราณสถานนั้น ๆ อยู่ใกล้กับแหล่งน้ำ มีผู้เสนอแนะให้ใช้วิธีโรยกรวดบริเวณฐานของโบราณสถานแล้วสร้างช่องระบายให้น้ำออก แต่วิธีนี้ก็ยังมีปัญหาเนื่องจากพบว่าน้ำบางส่วนที่ถูกดูดซึมอยู่ในบริเวณที่ห่างจากช่องระบายน้ำนั้น ไม่สามารถเคลื่อนสู่ช่องระบายแล้วระเหยออกไปได้ อีกทั้งการจะสร้างช่องระบายน้ำในทุกบริเวณทั่วทั้งพื้นที่ของปูนก่อและปูนฉาบ ก็ไม่เหมาะสม ดังนั้นวิธีนี้จึงลดปัญหาจากการเสื่อมสภาพได้ระดับหนึ่งเท่านั้น

นอกจากนี้ยังมีวิธีอนุรักษ์ซึ่งอยู่ระหว่างศึกษาวิจัยข้อดี ข้อเสีย และความเป็นไปได้ที่จะใช้ เบนโทไนท์ (Bentonite) หรือ ดินที่ประกอบด้วยแร่ดินกลุ่ม สมคโทท์ (Smectite) แร่ดินกลุ่มนี้มีแร่มอนริลโลไนท์ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำสูงเป็นองค์ประกอบสำคัญ เมื่ออิมตัวด้วยน้ำแล้วจะขยายตัวใช้เป็นแผ่นกันน้ำได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากคุณสมบัติ

ที่สามารถขยายตัวได้มากนัก การจะใช้วิธีนี้จำเป็นต้องศึกษาผลกระทบต่อรากฐานและลักษณะโครงสร้างศิลปกรรมจากการขยายตัวและคืนตัว (จิราภรณ์ อรัณยะนาค, 2544)

2.3.1.2 การบูรณะปฏิสังขรณ์

การบูรณะปฏิสังขรณ์ศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบ ดำเนินการด้วยวิธีการพอง การซ่อมแซม วิธีการพองนี้จะใช้การค้ำยันด้วยเหล็ก ไม้ หรือคอนกรีต ทั้งนี้พิจารณาตามลักษณะวัสดุปูนก่อและปูนฉาบที่ใช้และสิ่งปลูกสร้างเป็นสำคัญ สำหรับวิธีการซ่อมแซมนั้นจะใช้ปูนก่อหรือปูนฉาบที่สร้างใหม่ก่อทดแทนเพื่อให้การถ่ายรับน้ำหนักที่ไม่สมดุลจากการชำรุดเสื่อมสภาพกลับมาสมดุลดั้งเดิม ช่างอนุรักษ์ใช้วิธีการจับขอบด้วยปูนขาวหมักผสมกาวยางสัตว์ ส่วนที่โป่งพองออกมาจะพิจารณาว่าคืนกลับสู่สภาพเดิมได้หรือไม่ ถ้าได้จะใช้วิธีนี้ แต่ถ้าไม่ได้ จะฉีกเกร้าท์ด้วยปูนขาวประเภทอนไฮดรอลิก หรืออาจใช้การฉาบทดแทนส่วนที่ชำรุดเสื่อมสภาพลงไป โดยทำความสะอาดปูนก่อ ปูนฉาบหรือผิวงาน เย็บขอบปูนที่ชำรุดและทาสารกันน้ำเป็นลำดับสุดท้าย ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงหลักการที่ว่า การซ่อมแซมจะต้องแตกต่างแต่กลมกลืน

นั่นคือระนาบของงานบูรณะใหม่ที่ต้องต่ำหรือลึกลงกว่าระนาบของปูนก่อ ปูนฉาบดั้งเดิม เพื่อให้แยกออกกระหว่างงานโบราณเดิมกับงานที่บูรณะใหม่ แต่ทว่าสิ่งที่ทำใหม่นั้นจะต้องกลมกลืนด้วยสีฐาน ผนังงาน สี ฯลฯ

2.4 ปัญหาการอนุรักษ์ศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบ

2.4.1 วัสดุที่ใช้

ศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบนั้นยากต่อการอนุรักษ์ ทั้งนี้เนื่องจากปูนก่อและปูนฉาบอันประกอบอยู่ในโบราณสถานนั้น ต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำมาบูรณะให้มีความกลมกลืนแต่ก็ต้องแตกต่างจากปูนก่อและปูนฉาบเดิม สามารถแยกได้ว่าเป็นส่วนที่บูรณะใหม่

อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติของปูนโบราณ เพื่อให้เกิดความใกล้เคียงกันระหว่างปูนโบราณและปูนใหม่ที่ใช้บูรณะเข้าไป จึงพบว่าความกลมกลืนระหว่างปูนขาวโบราณกับปูนขาวที่นำมาบูรณะสูง ลดปัญหาการใช้วัสดุผิด

ประเภทในการบูรณะซึ่งอาจส่งผลเสียระยะยาวได้ ดังเช่น การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ฉาบแทนปูนขาว พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นมีความยืดหยุ่นและความพรุนน้อยกว่าปูนขาว ทั้งยังมีเกลือผสมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อนำมาใช้บูรณะจึงเท่ากับเป็นการปิดทางระเหยของน้ำและน้ำยังละลายเกลือจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกมาเกิดเป็นคราบเกลือหรืออาจตกผลึกอยู่ภายในเป็นปัญหาดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.4.2 ทักษะความรู้ความเข้าใจของผู้ปฏิบัติงาน

ปัญหาในส่วนนี้ในอดีตเป็นปัญหามาก เนื่องจากในอดีตงานวิจัยเพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบเสื่อมสภาพยังมีน้อย วิธิดำเนินการลดการเสื่อมสภาพจึงยังไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมที่สุด และบางครั้งอาจเกิดปัญหาตามมาในภายหลังอีกด้วย แต่ปัจจุบันปัญหาลดลงไปแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากความร่วมมือจากหลายฝ่ายในการวิจัยเพื่อให้ได้แนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา อย่างไรก็ตามก็ยังคงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป

2.5 สารกันน้ำที่ใช้อนุรักษ์ปูนก่อและปูนฉาบ

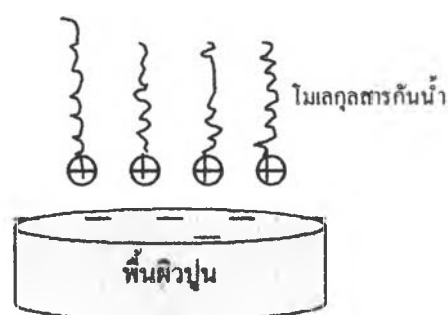
ในอดีตตั้งแต่สมัยกรีกและโรมัน การป้องกัน โบราณสถานจากการรบกวนภายนอกใช้น้ำมัน(Oil) และไข (Wax) ในการเคลือบหินอ่อน กระทั่งยุคกลางอันเป็นยุคที่ประติมากรรมเฟื่องฟูโดยเฉพาะทางตอนเหนือของยุโรปมีการใช้รงควัตถุ (Polychrome) เพื่อป้องกันรักษาสภาพหินเหล่านั้น เข้าสู่ยุคเรเนซองค์ (Renaissance) หินที่ก่อสร้างหลายชนิดจะฉาบเคลือบด้วยปูนปั้นแล้วตกแต่งด้วยสี (Coloured stucco) จนถึง ศตวรรษที่ 19 น้ำมันและไข เช่น Paraffin wax ชันสน ถูกนำมาใช้เป็นสารกันน้ำ (Water repellent) และยังคงพบว่ามีฉาบทับด้วยปูนฉาบหรือสีทับเพื่ออนุรักษ์วัสดุภายใน

กระทั่งปัจจุบัน วิธีการอนุรักษ์เปลี่ยนแปลงไปคือจะเน้นการป้องกันที่สิ่งแวดล้อมเป็นส่วนมาก และสิ่งแวดล้อมที่ก่อปัญหาต่อการเสื่อมสภาพของปูนก่อและปูนฉาบเป็นอย่างดี คือ น้ำ จึงใช้วิธีเคลือบทับปูนก่อและปูนฉาบด้วยสารกันน้ำ (Water proof, Water repellent หรือ Hydrophobization) สารกันน้ำที่ใช้ระยะแรกจะเป็นสารกันน้ำที่เคลือบแล้วเกิดเป็นฟิล์มแข็งบนผิววัสดุและทำให้เนื้อวัสดุเปลี่ยนสีไปจากเดิม ทำให้เกิดเป็นข้อโต้แย้งในงานอนุรักษ์ที่ต้องการรักษาไว้ซึ่งสภาพเดิมให้มากที่สุด ดังนั้นจึงเริ่มพัฒนาเป็นการเคลือบที่ไม่ทำให้เกิดฟิล์มที่ผิว การใช้สารกันน้ำประเภทนี้จะป้องกันน้ำที่เป็นของเหลวเท่านั้น แต่ไอน้ำ

ยังสามารถซึมผ่านได้ และสารกันน้ำที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ น้ำยาซิลิโคน สำหรับงานก่อ ซึ่งหมายถึง สารละลายของสารที่ไม่ระเหย (ซึ่งส่วนใหญ่เป็นซิลิโคน) ในตัวทำละลายที่ระเหยได้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2528)

การสังเคราะห์ซิลิโคนนั้น เริ่มเมื่อ ค.ศ. 1899 โดย Kipping และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดมา จนกระทั่งปี ค.ศ. 1940 การสังเคราะห์ซิลิโคนก็เริ่มพัฒนาไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์โดยประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศแรก ซิลิโคนที่สังเคราะห์ได้มีทั้งในรูปของไหล (Fluid) ยาง (Rubber) และเรซิน (Resin) ทั้ง 3 ประเภทถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางทั้งเพื่ออุตสาหกรรมและประโยชน์เชิงการอนุรักษ์สถาปัตยกรรม ศิลปกรรมต่าง ๆ หลายประเภทรวมทั้งศิลปกรรมจากปูนก่อและปูนฉาบซึ่งจะใช้ซิลิโคนประเภทเรซิน เนื่องจากน้ำเป็นสสารที่มีขั้ว คือ เป็นขั้วบวกที่อะตอมของไฮโดรเจน และเป็นขั้วลบที่อะตอมของออกซิเจนและปูนขาวเป็นสสาร ที่มีขั้วเช่นกันจึงเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างวัสดุปูนก่อกับน้ำเรียกว่า ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) นั่นคือขั้วลบของปูนขาวจะพยายามดึงขั้วบวกของน้ำเข้ามาสู่โมเลกุล

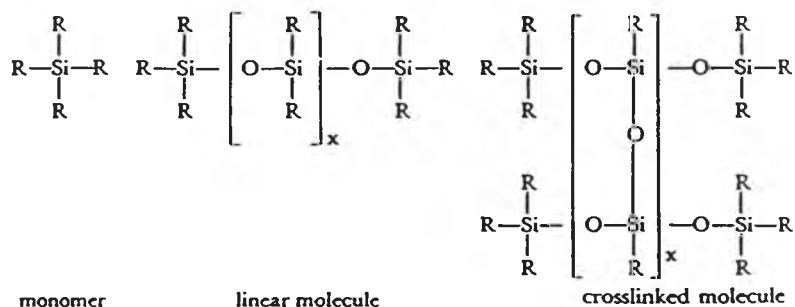
ในขณะที่โมเลกุลพวกสารกันน้ำ ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว ด้านที่มีขั้วนั้นจะถูกดึงดูดโดยปูนขาวและจะหันด้านที่ไม่มีขั้วออกมา ส่งผลให้ผิวปูนแสดงสมบัติที่ไม่มีขั้ว ลักษณะการสร้างพันธะแสดงได้ดังภาพที่ 2.11 คุณสมบัติดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดปัญหาของน้ำที่ส่งผลต่อความเสียหายของโบราณสถานจากปูนก่อและปูนฉาบ



ภาพที่ 2.11 การสร้างพันธะระหว่างสารกันน้ำกับพื้นผิวปูน

ซิลิโคนเป็นโพลีเมอร์ที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (Si) ออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C) ที่อะตอมของซิลิกอนจะมีหมู่ไฮโดรคาร์บอนต่อโดยตรงกับซิลิกอนอยู่ ออกซิเจนจะเกิดพันธะกับซิลิกอน (Si-O) เรียกว่า พันธะซิลอกเซน (Siloxane bond) ซึ่งแสดงสมบัติของสารอนินทรีย์ พันธะซิลอกเซนที่เกิดขึ้นจะเชื่อมโยงกันแบบร่างแหเป็นสารประกอบโพลีซิลอกเซน (Polysiloxane compound) สำหรับอะตอมของคาร์บอนนั้นจะเกิดพันธะ

กับอะตอมซิลิกอนด้วย พันธะอแกโนซิลิกอน (Organosilicon linkage) มีลักษณะของโครงสร้างดังภาพ



ภาพที่ 2.12 สูตรโครงสร้างของซิลิโคน (Lambourne, 1993)

ทั้งพันธะซิลอกเซนและพันธะอแกโนซิลิกอน จะเชื่อมโยงกันเป็นสารประกอบอแกโนซิลิกอน (Organosilicone compound) สารประกอบซิลิโคอแกเนก (Silicoorganic compound) และอแกโนโพลีซิลอกเซน (Organopolysiloxane compound) สารประกอบเหล่านี้เป็นสารตั้งต้นของซิลิโคนดังปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซิลิโคน

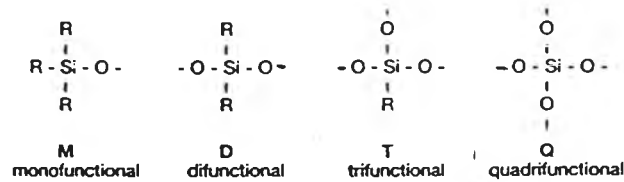
ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซิลิโคน มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมซิลิกอน
- 2) เตรียมไซเลนด้วยการสังเคราะห์โดยตรง และโดยกรินยาร์ด

การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยากรินยาร์ดนั้น เหมาะที่จะใช้เตรียมทั้ง อัลคิลหรืออัลริลไซเลน รวมทั้งในกรณีที่ต้องการไซเลนในปริมาณมาก แต่ปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้ มักเตรียมไซเลนด้วยการสังเคราะห์โดยตรงที่มีความคุ้มค่าและเตรียมได้ง่ายกว่า ทำได้โดยใช้ซิลิกอนทำปฏิกิริยากับอัลคิลหรืออัลริลคลอไรด์ ไซเลนที่ได้มักเป็นกลุ่มของอแกโนคลอโรไซเลน เช่น เมทิลไครคลอโรไซเลน (CH_3SiCl_3) ไดเมทิลไครคลอโรไซเลน $[(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2]$ เมทิลไฮโดรเจนไครคลอโรไซเลน $[(\text{CH}_3)\text{HSiCl}_2]$ ไตรเมทิลไครคลอโรไซเลน $[(\text{CH}_3)_3\text{HSiCl}]$ เตตระคลอโรไซเลน (SiCl_4) หรือไครคลอโรไซเลน (HSiCl_3)

3) เตรียมไซเลนอล

ผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยา คือ อนุพันธ์ M ของซิลิโคน (R_3SiOH) อนุพันธ์ D ของซิลิโคน [$R_2Si(OH)_2$] อนุพันธ์ T ของซิลิโคน [$RSi(OH)_3$] หรืออนุพันธ์ Q [$Si(OH)_4$] ของซิลิโคน ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 คือ อนุพันธ์ M D T และ Q ของซิลิโคน (Charola, 1995)

4) ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน

การเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันของซิลิโคนสามารถเกิดได้ หลายทางดังต่อไปนี้

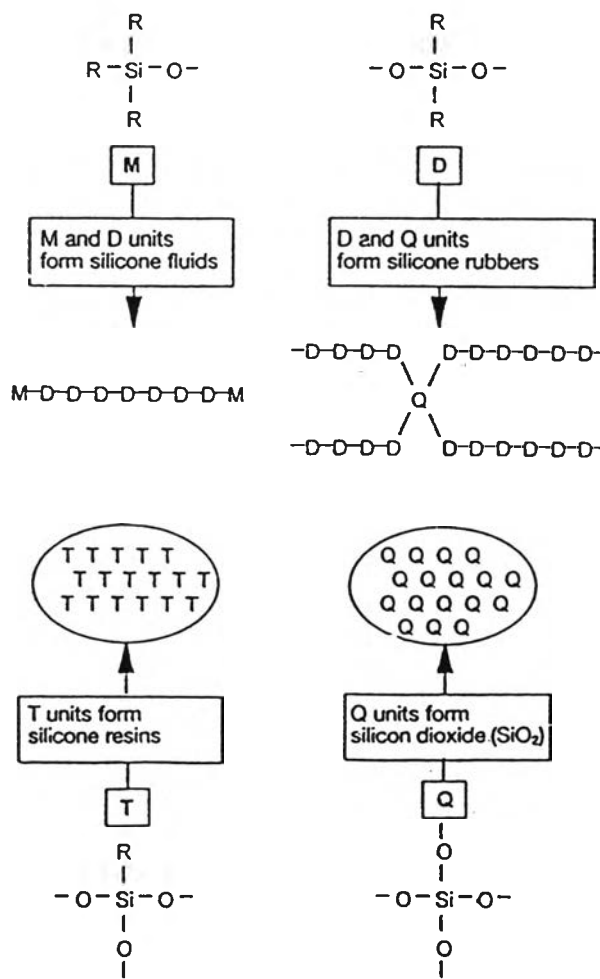
- การเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันโดยความร้อน
- การเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- การเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันโดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

อนุพันธ์ของซิลิโคนที่เชื่อมโยงกัน จะทำให้ได้ซิลิโคนต่างชนิดกัน 3 ประเภทคือ

(1) ซิลิโคนที่เป็นของไหล หรือซิลิโคนฟลูอิด (Silicone fluids) เกิดจากการเชื่อมโยงของอนุพันธ์ D เชื่อมโยงกับ M แบบ MD_xM_x น้อยกว่า 2,000 D:M มีผลต่อความหนืด ซิลิโคนประเภทนี้มักใช้เพื่อการอนุรักษ์เนื่องจากคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายประการคือเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่ทำให้พื้นผิวเกิดการเปลี่ยนสี ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น รส มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และมีจุดเยือกแข็งต่ำมาก ช่วงความหนืดกว้าง คือ ประมาณ 0.65 - 10,000 cst เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน การเปลี่ยนแปลงความหนืดจะน้อย ความตึงผิวต่ำกว่ากับ 50 - 1000 cst มีความตึงผิวที่อุณหภูมิห้อง 20.5 - 21.1 dyne/cm ค่าการนำความร้อนค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง มีค่าความจุจำเพาะ (Specific heat) 0.35-0.37 cal/g ที่อุณหภูมิ 0 - 100 องศาเซลเซียส สามารถสร้างพันธะกับพื้นผิวที่นำไปใช้ได้ดี บางชนิดสามารถลดการซึมผ่านของไอน้ำได้ ประมาณร้อยละ 5 - 8

(2) ซิลิโคนที่เป็นยาง : หรือซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ (Silicone rubber, Silicone elastomer, Silicone gum) เกิดจากการเชื่อมโยงของอนุพันธ์ D เชื่อมโยงกับ Q แบบ MD_xM_x มากกว่า 2,000

(3) ซิลิโคนเรซิน (Silicone resin) เกิดจากการเชื่อมโยงของอนุพันธ์ T เชื่อมโยงกับ Q แบบ MDT เป็นส่วนมากและอาจมี MDTQ เป็นส่วนน้อย ซิลิโคนเรซิน ส่วนมากใช้ในงานเคลือบผิว



ภาพที่ 2.14 การเชื่อมโยงอนุพันธ์ M D T และ Q ของซิลิโคน (Charola, 1995)

ตารางที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์ซิลิโคน

| กระบวนการ | สารตั้งต้น | ผลิตภัณฑ์ |
|---------------------------------------|--|--|
| 1) เตรียมซิลิกอน | $\text{SiO}_2 + \text{C} + \text{Heat}$ | $\text{Si} + \text{CO}$ |
| 2) เตรียมซิลเลน ▶ สังเคราะห์โดยตรง | $2 \text{RCl} + \text{Si}$ | R_2SiCl_2 |
| ▶ สังเคราะห์โดยปฏิกิริยากรีนิยาร์ด | $\text{CH}_3\text{SiCl}_3 + \text{C}_6\text{H}_5\text{MgBr}$ $\text{RMgCl} + \text{SiHCl}_3$ $\text{RMgCl} + \text{SiHCl}_3$ $\text{RMgCl} + \text{SiHCl}_3$ | $\text{Cl-Si-Cl} + \text{MgBrCl}$ $\text{RSiHCl}_2 + \text{MgCl}_2$ $\text{R}_2\text{SiHCl}_2 + \text{MgCl}_2$ $\text{R}_3\text{SiHCl}_2 + \text{MgCl}_2$ |
| 3) เตรียมซิลเลนอล | $\text{SiO}_2 + 2\text{C} + 2\text{Cl}_2 + \text{Heat}$ $\text{R}_3\text{SiCl} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{R}_2\text{SiCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{RSiCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ | $\text{SiCl}_4 + 2\text{CO}$ $\text{R}_3\text{SiOH} + \text{HCl}$ $\text{R}_2\text{Si(OH)}_2 + \text{HCl}$ $\text{RSi(OH)}_3 + \text{HCl}$ |
| 4) ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน | <p style="text-align: right;">(Charola, 1995)</p> | |

2.5.1 Silanes

เป็นโมโนเมอร์หรือไดเมอร์ซิลิโคนเรซินที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด คือ อะตอมของซิลิกอนสร้างพันธะกับอะตอมข้างเคียง โดยมากมักสร้างพันธะกับไฮโดรคาร์บอน

ไซเลนถูกใช้ในงานอนุรักษณ์อย่างแพร่หลายมานานแล้ว เช่น เตตระเอทอกซีไซเลน (Tetraethoxy silane - TEOS) โดยใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อปูน อิฐ หิน ฯลฯ ไซเลนมีความหนืดต่ำจึงสามารถซึมเข้าสู่เนื้องานได้ดี การซึมผ่านสู่เนื้องานอย่างดีนี้เป็นประโยชน์มากในเชิงอนุรักษณ์ เพราะทำให้สามารถป้องกันน้ำได้มากขึ้น แต่ไซเลนก็มีข้อเสียที่อัตราการระเหยของไซเลนค่อนข้างต่ำ

จนกระทั่งใน ค.ศ. 1960 ได้พัฒนาปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันของไซเลน โดยไซเลนที่นิยมใช้ ได้แก่ เมทิลไตรอัลคอกซีไซเลน (Methyltrialkoxysilane) สารที่ได้มีคุณสมบัติเป็นสารกักน้ำให้กับวัสดุได้ดี นอกจากนี้ยังได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการซึมผ่านเข้าไปสู่เนื้องานของไซเลนโดยผสมอัลคิลไตรอัลคอกซีไซเลน น้ำ ตัวทำละลายรวมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าด้วยกัน ก่อนที่จะนำไปใช้งาน สารละลายที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวแต่จะแปรสภาพเป็นเจลเมื่อทิ้งไว้ภายใต้ความดันบรรยากาศ 2-3 ชั่วโมง

แม้ว่าจะมีการใช้ไซเลนมาเคลือบผิววัสดุมานานแล้วแต่ก็พบว่าเนื้องานยังสามารถผุกร่อนได้อยู่ บางครั้งจึงพบว่ามีการใช้อะคริลิกโพลีเมอร์ หรืออีพอกซีเรซินเข้ามาผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้องานด้วย

อย่างไรก็ตามปัจจุบันนี้ ไซเลนโพลีเมอร์ก็ยังใช้อยู่ต่อไปและยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อการอนุรักษณ์วัสดุประเภทปูน อิฐ หิน ฯลฯ และยังมีความพยายามที่จะใช้กับวัสดุประเภทไม้ เครื่องจักสาน รวมทั้งกระดาษอีกด้วย

2.5.2 Siloxanes

ไซลอกเซนเป็นโมเลกุลที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันของโมโนเมอร์หรือไดเมอร์ไซเลน โดยมากเป็นปฏิกิริยาของกลุ่มออกแกโนฟังก์ชันนัล ไซเลน (Organofunctional silane) นิยมใช้ อัลคิลอัลคอกซีไซเลน (Alkylalkoxysilane) หรือ อนุพันธ์ T 3 - 4 โมเลกุล สารดังกล่าวจะสร้างพันธะเชื่อมโยงแบบร่างแห (Crosslink) ด้วยพันธะไซลอกเซน

เกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) กลายเป็นอัลคิลอัลคอกซีไซเลนโมเลกุลใหญ่ (Oligomeric alkylalkoxysilane)

การสร้างโมเลกุลดังกล่าวจะเกิดโดยมีเมทานอลหรือเอทานอล หมู่ออกทิล (Octyl, C_8H_{17}) หรือหมู่เมทิล (Methyl, CH_3) หรือคาร์บอนิล (Carbonyl) ร่วมในปฏิกิริยาดังกล่าว เช่น เมทิลไซลอกเซน ซึ่งมีอนุพันธ์แบบ T 6 หน่วยและมีอัลคอกซิลอยู่ ร้อยละ 30 - 40 โดยน้ำหนัก

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของไซลอกเซนนั้น เกิดจากโมเลกุลของไซเลน 2 โมเลกุล รวมตัวกับน้ำและปลดปล่อยแอลกอฮอล์ 2 โมเลกุล คือ ไซลานอล (Silanol) ดังปฏิกิริยา ไซลานอลที่เกิดขึ้นจะเชื่อมต่อกันเป็นโพลีไซลอกเซน เป็นโครงสร้างแบบตาข่ายด้วยพันธะไซลอกเซน เป็นฟิล์มที่ทนต่อสารเคมีและสภาพแวดล้อม

โดยปกติแล้วไซลอกเซนจะมีสมบัติเป็นของเหลวที่ระเหยได้น้อยมาก การแทรกซึมสู่เนื้องานดำ ไซลอกเซนจึงมักเกาะเป็นฟิล์มอยู่ที่ผิว ลอกหรือทำให้หลุดจากวัสดุได้ยาก ต้องใช้โกลูอินล้างออกมา

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติที่ดีของไซลอกเซนก็คือ ปฏิกิริยาที่เกิดปฏิกิริยาเร็ว เนื่องจากความดันไอภายใต้ความดันบรรยากาศของโพลิโกลูอินไซลอกเซนสูง จึงทำให้ความชื้นในรูปไอน้ำผ่านเข้าออกได้ดีสมบัตินี้จะคล้ายกับไซเลน

ซิลิโคนประเภทนี้ (Silicone oil) ยังถูกใช้ในงานอนุรักษ์เพื่อที่จะลดการเกิด Foaming ของโพลีเมอร์อีพ็อกซีและใช้ในการเคลือบวัสดุที่เป็นโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง สังกะสี นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวกลางที่เก็บรักษาฟอสซิลอีกด้วย

2.5.3 Silicone resin

ซิลิโคนเรซินมีเสถียรภาพมากกว่าสารประเภทไซเลน ถูกนำไปใช้ทาผิวสิ่งปลูกสร้างจากอิฐหรือปูนเพื่อการอนุรักษ์มานานแล้วตั้งแต่สมัยกลางจนถึง ค.ศ. 1980 มีการพัฒนาโพลีคอนเดนเซชันซิลิโคนเรซิน ปรากฏว่าให้ผลที่ดีขึ้นกว่าเดิม โดยผลที่ได้จะเป็นซิลิโคนที่มีความหนืดสูงลักษณะคล้ายยาง เมื่อนำไปละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วทาหรือฉาบบนพื้นผิว พบว่าการยึดเกาะพื้นผิวจะได้ผลดี คือ ความคงทนต่อการใช้งานสูงขึ้น

ทั้งนี้เนื่องจากเชื่อม โยงทางพันธะของซิลิโคนเรซินรวมตัวกับกลุ่มของสารอินทรีย์ ที่แสดงคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เกิดเป็นควอร์ทซ์ หรือ Water glass ที่โครงสร้างเปลี่ยนแปลงมาจาก เกลือโพแทสเซียม (Si - O - K^+) และ เอทิลซิลิเกต (Si - OEt) ที่โครงสร้างเปลี่ยนแปลงมาจากเอทานอล

ควอร์ทซ์ ที่เกิดนั้นสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ ทั้งยังสามารถเกิดปฏิกิริยาซิลิฟิเคชัน (Silification) ได้เช่นกัน โดยพบว่าควอร์ทซ์จะปล่อยโพแทสเซียมคาร์บอเนตได้เมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ขณะที่เอทิลซิลิเกตจะปล่อยเอทานอลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ

ซิลิโคนเรซิน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คืออยู่ระหว่าง 2,000 - 5,000 ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับออลิกันเรซินอื่น ๆ โดยประกอบด้วยอนุพันธ์ T 30 - 80 หน่วยให้ผลพลอยได้เป็นเอทานอลร้อยละ 2 - 4 โดยน้ำหนัก ซิลิโคนเรซินที่เป็นที่รู้จักกันมากคือ เมทิลซิลิโคนเรซิน เมื่อใช้ทาผิวงานวัสดุแล้ว หลังจากแห้งแล้วจะเกิดการสร้างพันธะแบบ Tack - free coating ซึ่งน้ำซึมผ่านได้ยากมาก อย่างไรก็ตามข้อเสียของซิลิโคนเรซิน คือ ทำให้สีของพื้นผิวเข้มขึ้นและความต้านทานต่อด่างมีจำกัด เนื่องจากในสภาพของด่างเข้มข้น เมทิลซิลิโคนเรซินจะเปลี่ยนเป็นซิลิโคเนตได้อย่างรวดเร็ว

2.5.4 Siliconates

สารในกลุ่มอัลคิลซิลิโคเนต (Alkyl silicate) นี้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ตั้งแต่ ค.ศ. 1960 โดยมีเกลือของโพแทสเซียมหรือโซเดียมของกรดอัลคิลซิลิซิก (Alkyl silicic acid) เป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดผลผลิตเป็น โพรพิลโพแทสเซียมซิลิโคเนต (Propyl potassium silicate) หรือ โพรพิลโซเดียมซิลิโคเนต (Propyl sodium silicate)

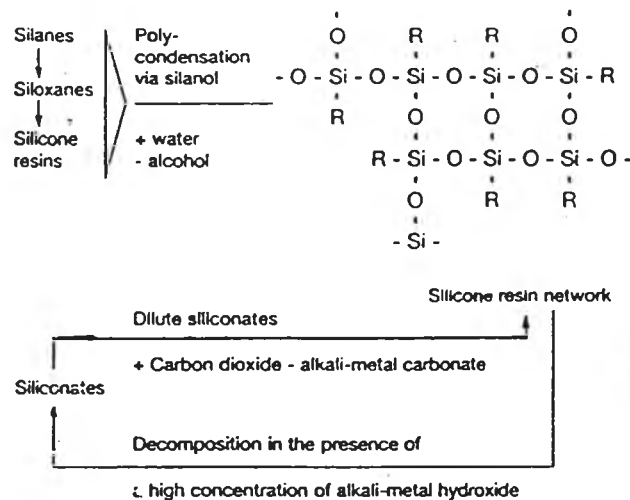
เนื่องจากมีโพแทสเซียมหรือโซเดียมเป็นองค์ประกอบ สารกลุ่มนี้จึงมีข้อดีที่สามารถละลายน้ำได้ แต่ก็ไม่สามารถละลายได้ในกรดและด่างทั่วไป ยกเว้นในด่างที่เข้มข้นเท่านั้น พบว่าเมื่อใช้ซิลิกอน 1 โมลทำปฏิกิริยากับด่าง 1 โมล จะได้ผลผลิตเป็นสารละลาย ด่างซิลิเกต (ซิลิโคเนตเป็นเกลือของออลิกันซิลิเกตที่ละลายน้ำ) ส่วนใหญ่มักจะสังเคราะห์โดยใช้ซิลิกอนทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ได้ผลผลิตเป็นโพแทสเซียมเมทิลซิลิโคเนตซึ่งมีสูตรทั่วไป คือ $\text{CH}_3\text{Si}(\text{OH})_2\text{O}^- \text{K}^+$ ในทางการค้า โพแทสเซียมเมทิลซิลิโคเนต จะมีแอกทิฟริเอเจนต์ ประมาณร้อยละ 40 อีกร้อยละ 50 จะเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

อย่างไรก็ตามก็มีข้อเสียคือสามารถนำพาไอออนของโลหะอัลคาไลไน์ เช่น โพแทสเซียมหรือโซเดียมคาร์บอเนตได้เช่นกัน

โพแทสเซียมเมทิลซิลิโคเนตเป็นตัวเลือกที่ดีของสารกันน้ำในงานวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากช่วงของความต้านทานกว้าง นิยมใช้ในการป้องกันความชื้นจากน้ำได้ดินอย่างไรก็ดีซิลิโคเนตใช้ได้ไม่ดีกับงานอนุรักษ์ในประเทศทางยุโรป เนื่องจากมีแนวโน้มว่าจะเกิดเป็นฟิล์มขาวและจะถูกชะออกได้ด้วยน้ำฝน แต่ก็ยังคงใช้อยู่ในงานก่อสร้างจากอิฐปูนภายนอกที่มีสีเทา แม้จะมีความเสี่ยงเรื่องของ Efflorescence สำหรับการเคลือบที่มีสีและเป็นรูปทูน

2.5.5 Silicone resin network

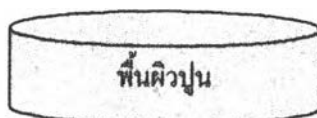
เมื่อซิลเลน ไซลอคเซน และซิลิโคนเรซิน และซิลิโคเนต เกิดปฏิกิริยากับ พื้นผิวของวัสดุที่ใช้จะเกิดการสร้างพันธะเป็น ซิลิโคนเรซินแบบร่างแห ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ซิลิโคนเรซินแบบร่างแห (Charola, 1995)

ปฏิกิริยาโพลิกอนเดนเซชันของซิลเลน ไซลอคเซน และซิลิโคนเรซินมี ตัวเร่งปฏิกิริยาคือความชื้น และจะปล่อยแอลกอฮอล์ออกมาจากปฏิกิริยา มีเพียงซิลิโคเนต เท่านั้นที่มีปฏิกิริยาที่ต่างออกไปคือจะปล่อยโพแทสเซียมคาร์บอเนตออกมาเมื่อได้ทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

จุดประสงค์ของกระบวนการนี้ก็คือเพื่อที่จะเกี่ยวข้องกับการใช้ซิลิโคนเป็นสารกันน้ำในศิลปกรรมนั่นเอง โดยจะใช้อนุพันธ์ T มาเกิดการสร้างพันธะเป็นซิลิโคนแบบร่างแหเป็นสารกันน้ำนั้นจะเชื่อมโยงกับพื้นผิวดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 การเชื่อมโยงของซิลิโคนแบบร่างแหกับพื้นผิว

ซิลิโคนแบบร่างแหจะสามารถต้านทานค้างได้ถ้ามีการเชื่อมโยงของโซ่โมเลกุลเหมาะสมพอ

เนื่องจากประสิทธิภาพของการกันน้ำขึ้นอยู่กับหมู่อัลคิล ดังนั้นเมทิลโพลีซิลอกเซน (Methy polysiloxane) จึงไม่นิยมใช้กับงานปูนก่อและปูนฉาบ หรือแม้แต่คอนกรีต เนื่องจากมีความเป็นด่างสูง จึงทำให้กันน้ำได้ในระยะเวลาไม่นานนัก เช่นเดียวกับกลุ่มอะโรแมติก เช่น เบนซิลกรุป ($-C_6H_5$) ที่ไม่นิยมใช้เช่นกันเนื่องจากในระยะยาวจะทำให้เกิดสีเหลือง

อย่างไรก็ดีประสิทธิภาพของสารกันน้ำยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ด้วย ดังนี้

- ลักษณะพื้นผิวเดิมมีความชื้นอยู่
- เกลือที่ละลายน้ำจะเกิดขึ้น
- วัสดุนั้นไม่มันคง หรือมีการเสื่อมสภาพอยู่แล้ว

- วัสดุนั้นมีรอยแยกแตก

ดังนั้นการเลือกใช้สารกันน้ำ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งก่อนที่จะใช้ต้องมีการศึกษา

- ลักษณะของวัสดุที่จะใช้
- ความเหมาะสมของชนิดและความเข้มข้นของสารกันน้ำ
- การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์
- การวิเคราะห์ส่วนที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมภายนอกในส่วนต่างๆ ของโบราณสถานที่จะรักษา
- ควรดำเนินการทดสอบเบื้องต้นของการดูดซึมน้ำ การระเหย การขยายตัวเนื่องจากน้ำ
- ระยะเวลาการแห้งก่อนเคลือบทับครั้งสุดท้าย 24 ชั่วโมง (กระทรวงอุตสาหกรรม, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2537)
- ในกรณีที่เคลือบพื้นผิวปูน ต้องปล่อยให้พื้นผิวปูนแห้งก่อนอย่างน้อย 28 วัน (กระทรวงอุตสาหกรรม, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2537) หรือทาน้ำยาซิลิโคนเมื่องานก่อเรียบร้อยแล้วไม่น้อยกว่า 3 สัปดาห์ (กระทรวงอุตสาหกรรม, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2528)

2.6 การสำรวจเอกสาร

Biscontin และ Riva (1982) ศึกษาคุณสมบัติของหินเมื่อเคลือบด้วยสารกันน้ำซิลิโคน รายงานผลว่าสามารถลดการซึมผ่านของความชื้นได้มากกว่าไม่ได้เคลือบร้อยละ 60 - 70 นอกจากนี้ได้พิจารณาวิธีเคลือบพบว่า การใช้แปรงทาแล้วผึ่งแดด 24 ชั่วโมงให้ผลดีกว่าการเคลือบด้วยแปรงทาและการจุ่ม

Lewin (1982) ใช้เครื่องมือที่อาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X - ray diffraction) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ศึกษาสถานวิทยา

(Morphology) ของปูนก่อและ ปูนฉาบที่มีอัตราส่วนผสมของปูนขาวต่อทรายเท่ากับ 1:3 รายงานผลว่าพื้นผิวของปูนก่อ ปูนฉาบดังกล่าวจะมีกลุ่มผลึกแคลไซต์ (Calcite) ของปูนขาวที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอกระจายอยู่ทั่วไปขณะที่เมื่อทรายกระจายตัวทั่วไปโดยไม่จับตัวเป็นกลุ่มก้อน

Peroni และคณะ (1982) ศึกษาปูนก่อจากปูนขาว (Lime mortar) ที่ใช้อัตราส่วนระหว่างปูนขาวและทราย 1 : 3 รายงานผลว่าความแข็งแรง (Strength) ของปูนก่อจากปูนขาวต่ำกว่าซีเมนต์ (Cement mortar) ส่วนความทนต่อแรงดึง (Flexural strength) ของปูนก่อจากปูนขาวมีค่าใกล้เคียงกับความทนแรงอัด (Compressive strength)

Schafer และ Khilsdorh (1993) ศึกษาคุณสมบัติของปูนก่อโบราณ และปูนก่อใหม่โดยพิจารณาจากลักษณะช่องว่างในชิ้นงาน ซึ่งทดสอบโดยวิธีวัดการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และวัดความพรุนโดยเครื่องมือ Mercury porosimeter รายงานผลว่า ในปูนก่อโบราณมีช่องว่างในชิ้นงานร้อยละ 30 - 40 ต่างจากปูนก่อใหม่ ที่มีเพียงร้อยละ 20 - 25 โดยปริมาตร ลักษณะส่วนใหญ่เป็นช่องว่างขนาดเล็ก (Micro pore) คือ มีรัศมีน้อยกว่า 10^5 nm ส่วนค่า Pore size distribution ไม่มีความแตกต่างกันในปูนก่อทั้ง 2 ประเภท แต่เมื่อเพิ่มสารเพิ่มการยึดติด (Binder) ลงไปในปูนก่อใหม่ จะทำให้ช่องว่างในปูนก่อดังกล่าวลดลง โดยที่ความทนแรงอัด (Compressive strength) จะเพิ่มมากขึ้น

Martinez และคณะ (1997) ศึกษาการเสื่อมสภาพของปูนก่อจากปูนขาว ในบรรยากาศจำลองที่มีมลสารได้แก่ NO , NO^2 , NO^3 , SO^2 , SO_3^{2-} , SO_4^{3-} พบว่ามลสารทุกตัวเกิดปฏิกิริยากับปูนก่อจากปูนขาวได้ ปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดได้ทั้งในสถานะที่มีและไม่มีควมชื้นในบรรยากาศและทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของปูนก่อจากปูนฉาบได้ทั้งสิ้น

Martinez และคณะ (1998) ศึกษาผลกระทบจากการตกกลับแบบแห้ง (Dry deposition) ของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่มีผลต่อปูนก่อจากปูนขาวในสถานะที่มีและไม่มีโอโซน (O_3) พบว่าเมื่อไม่มี O_3 , NO และ NO_2 สามารถเปลี่ยนเป็นกรดไนตริก (HNO_3) ได้เมื่อมีความชื้นเป็นตัวเร่ง และ HNO_3 จะทำปฏิกิริยากับปูนเกิดเป็น $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$ ทำให้เสื่อมสภาพ สำหรับสถานะที่มี O_3 โอโซน นั้น NO และ NO_2 จะเกิดปฏิกิริยากับ O_3 และความชื้นในบรรยากาศเกิดผลึกเกลือทำให้ปูนก่อเสื่อมสภาพเช่นกัน สำหรับ SO_2 ก็ให้ผลเช่นเดียวกับ NO , NO_2 แต่ผลจากปฏิกิริยาระหว่าง SO_2 กับความชื้นจะได้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และก่อให้เกิดเกลือแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) แต่ผลต่อการเสื่อมสภาพของปูนนั้นเป็นไปในทำนองเดียวกัน