


อัตราการกัดกร่อนอิฐเก่าจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)



นางสาวพัชรวิไล พงษ์พานิช

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1321-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CORROSION RATE OF HISTORICAL BRICK BY SULFUR DIOXIDE



Miss Patwalai Pongpanich

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partail Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Master of Science in Environmental Science (Inter-department)

Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2004
ISBN 974-53-1321-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อัตราการกักก่่อนอนิฐูเก่าจากก้าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)
โดย นางสาวพัชรวิไล พงษ์พานิช
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. สุรัตน์ บัวเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว.กัลยา ติงศรัทิธิย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ ไขษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สุรัตน์ บัวเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา เลิศปรีชญา)

..... กรรมการ
(ดร. พอจำ อรัณยกานนท์)

พัชรวิไล พงษ์พานิช : อัตราการกัดกร่อนอิฐเก่าจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)
(CORROSION RATE OF HISTORICAL BRICK BY SULFUR DIOXIDE) อาจารย์ที่ปรึกษา
: อาจารย์ ดร. สุวัฒน์ บัวเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ
เพ็งปรีชา, 180 หน้า. ISBN 974-53-1321-1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการกัดกร่อน และสร้างสมการ ที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของวัสดุ 4 ชนิด ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน โดยทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือเพื่อสร้างสภาวะสมมติในการทดสอบการกัดกร่อนแบบเร่ง โดยให้วัสดุสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น ต่างๆ 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน เป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์ แล้วศึกษาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ได้แก่ ศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์โครงสร้างวัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และทำการหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป เพื่อนำไปคำนวณหาสมการอัตราการกัดกร่อนจากผลการทดลองพบว่าหลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีเกลือซัลเฟตเกิดขึ้นบนวัสดุ และวัสดุมีน้ำหนักหายไป โดยอัตราการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, เวลาในการสัมผัส และชนิดของวัสดุ ซึ่งวัสดุที่สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง จะเกิดการกัดกร่อนสูง โดยวัสดุที่เกิดการกัดกร่อนมากที่สุด ได้แก่ ปูนปั้นเก่า รองลงมาคือปูนปั้นปัจจุบัน, อิฐเก่า และอิฐปัจจุบัน ตามลำดับ และระยะเวลาที่วัสดุสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นานก็ยิ่งเกิดการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อผู้คิด.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4589115920 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD : CORROSION RATE / HISTORICAL BRICK / SULFUR DIOXIDE

PATWALAI PONGPANICH : CORROSION RATE OF HISTORICAL BRICK BY
SULFUR DIOXIDE. THESIS ADVISOR : SURAT BUALERT Ph.D. THESIS CO-
ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMJAI PENGPRICHA., 180 pp. ISBN 974-53-1321-1

The objective of this research is to study corrosion and determine the equations for prediction of corrosion of historical brick, modern brick, historical stucco and modern stucco. The methodology was to develop a tool system to produce results under pre-determined conditions for accelerative corrosion testing and setting those materials' contact at 5 concentrations of sulfur dioxide. The concentrations are 50, 100, 200, 400 and 800 parts per million for a period of 10 weeks under 29.5 ± 2 °C and 65 ± 10 % relative humidity. The test materials' surface appearance was analyzed by Scanning Electron Microscope. The test materials' structure was analyzed by X-ray diffraction and establishing the rate of corrosion,(%), in order to develop a formula for calculating corrosion. After the experiment, it was found sulfate salts on material and had weight loss. The corrosion rate of material depended on sulfur dioxide concentration, exposure time and type of material that the materials which were exposed to highly concentrated sulfur dioxide were more corroded. Additionally, the most-corroded material was historical stucco, followed by modern stucco, historical brick and, lastly, modern brick. The duration of sulfur dioxide contact also effected the corrosion level, with longer exposures causing more corrosion.

Field of Study Environmental Science

Academic year 2004

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการเอาใจใส่ ดูแล และให้การช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ อาจารย์ ดร. สุรัตน์ บัวเลิศ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงสละเวลาช่วยเหลือในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณอนก สีหามาตย์ ผู้อำนวยการสำนักงานศิลปากรที่ 3 พระนครศรีอยุธยา ที่ได้เอื้อเพื่อให้วัสดุโบราณในการนำมาวิจัย และขอขอบคุณ คุณปิติ พงษ์พานิช ประชาสัมพันธ์จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในความเอื้อให้ความช่วยเหลือ และติดต่อประสานงาน

ขอขอบคุณกรมโรงงาน และ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดงรัก ในการเอื้อเพื่ออุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สำหรับกองทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทั่วไป จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือในการดำเนินการในเรื่องต่างๆ ตลอดการทำวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้เลย หากปราศจากการช่วยเหลือ และกำลังใจที่ดี เยี่ยมจากเพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับครอบครัว "พงษ์พานิช" คือ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ต้น พี่เต๋ย ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งด้านกำลังใจ กำลังใจ และกำลังทรัพย์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ และคุณค่าจากปริญญาวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ครอบครัว ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอนและอบรมผู้วิจัย หากมีข้อบกพร่องใดๆ ผู้วิจัยขอน้อมรับแต่เพียงผู้เดียว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 การดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัย.....	6
2.1 มลพิษทางอากาศ.....	6
2.2 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	7
2.3 คุณภาพอากาศและค่ามาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.4 อีฐและปูนปั้น.....	18
2.5 การกีดกร่อนและการอนุรักษ์โบราณสถานและโบราณวัตถุ.....	33
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	50
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	55
3.1 ศึกษาปัญหาเบื้องต้น.....	55
3.2 การพัฒนาวิธีการ.....	64
3.3 การศึกษาการกีดกร่อนและอัตราการกีดกร่อน.....	67
3.4 การประยุกต์ใช้สมการอัตราการกีดกร่อน.....	72

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	73
4.1 ลักษณะพื้นที่ศึกษา.....	73
4.2 การพัฒนาวิธีการ.....	79
4.3 ลักษณะของวัสดุตัวอย่าง.....	91
4.4 ผลการกักกรอง.....	93
4.5 อัตราการกักกรอง.....	106
4.6 การประยุกต์ใช้อัตราการกักกรอง.....	124
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	129
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	129
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	134
รายการอ้างอิง.....	136
ภาคผนวก.....	143
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	144
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ปริมาณ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	156
ภาคผนวก ค การคำนวณการกักกรอง.....	175
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	180

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบภาวะมลพิษทางอากาศ.....	6
รูปที่ 2.2 Annual emissions of sulfur dioxide and the atmospheric sulfur dioxide cycle...12	12
รูปที่ 2.3 แผนภูมิกรรมวิธีในการผลิตอิฐ.....	25
รูปที่ 2.4 แผนผังกระบวนการเปลี่ยนแปลงของปูนปั้น.....	31
รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการแข็งตัวของปูนปั้น.....	32
รูปที่ 2.6 สภาพผนังของเมรุองค์มุดด้านทิศใต้ในปัจจุบันไม่มีหลังคา.....	46
รูปที่ 2.7 ภาพปูนปั้นเล่าเรื่องพุทธประวัติบริเวณกำแพงของเมรุ.....	47
รูปที่ 2.8 พระพุทธรูปที่สร้างขึ้นมาจากศิลาแลง ซึ่งถูกทำลายทิ้งโดยมนุษย์จากการเผาทำลายครั้ง ทำสงครามกับพม่า ในสงครามเก้าทัพ และจากการกัดกร่อน ผุสลายจากธรรมชาติ.....	47
รูปที่ 3.1 ชุดเก็บตัวอย่างอากาศ ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง.....	57
รูปที่ 3.2 Scanning Electron Microscope ของ JEOL รุ่น JSM-5400.....	71
รูปที่ 3.3 X-ray diffraction (XRD) รุ่น D8 Advance.....	71
รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งละเอียด ของ Sartorius รุ่น BA210S.....	72
รูปที่ 4.1 แผนผังบริเวณเกาะเมือง จ.พระนครศรีอยุธยา.....	74
รูปที่ 4.2 แผนผังตำแหน่งการจัดวางพลู ประทัด และเครื่องมือตรวจวัดก๊าซ.....	76
รูปที่ 4.3 ทิศทางของลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทย.....	77
รูปที่ 4.4 แผนผังส่วนประกอบของวิธีการศึกษาการกัดกร่อน.....	80
รูปที่ 4.5 แผนผังวิธีการที่ทำการพัฒนาเพื่อใช้ในการศึกษาการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน.....	86
รูปที่ 4.6 ลักษณะอิฐเก่าก่อนทำการทดลอง.....	93
รูปที่ 4.7 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของอิฐเก่าที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	94
รูปที่ 4.8 อิฐปัจจุบันก่อนทำการทดลอง.....	94
รูปที่ 4.9 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของอิฐปัจจุบันที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	95
รูปที่ 4.10 ลักษณะปูนปั้นเก่าก่อนทำการทดลอง.....	96
รูปที่ 4.11 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของปูนปั้นเก่าที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	96

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.12 ปูนปั้นเก่าก่อนทำการทดลอง.....	97
รูปที่ 4.13 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของปูนปั้นปัจจุบันที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	98
รูปที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิฐเก่า.....	100
รูปที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิฐปัจจุบัน.....	101
รูปที่ 4.16 ลักษณะโครงสร้างภายในของปูนปั้นเก่า.....	102
รูปที่ 4.17 ลักษณะโครงสร้างภายในของปูนปั้นปัจจุบัน.....	102
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายกับความเข้มข้น ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัสของอิฐเก่า.....	107
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายกับความเข้มข้น ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัสของอิฐปัจจุบัน.....	109
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายกับความเข้มข้น ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัสของปูนปั้นเก่า.....	110
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายกับความเข้มข้น ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัสของปูนปั้นปัจจุบัน.....	112
รูปที่ 5.1 แผนผังกระบวนการการกัดกร่อน.....	130

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	แสดงวิธีการศึกษาการกักต่อนและอัตราการกักต่อนในงานวิจัย.....	3
ตารางที่ 1.2	แสดงค่าของตัวแปรอิสระต่างๆที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย.....	4
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	8
ตารางที่ 2.2	การวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	14
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบของอากาศบริสุทธิ์แห่งที่ระดับน้ำทะเล.....	15
ตารางที่ 2.4	มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย.....	16
ตารางที่ 2.5	มาตรฐานการระบายสารมลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมของ กรมโรงงานอุตสาหกรรม.....	17
ตารางที่ 3.1	ปริมาตรสารละลายซัลไฟท์-ทีซีเอ็ม และ 0.04 M TCM ที่ใช้เตรียม สารละลายมาตรฐาน.....	62
ตารางที่ 3.2	แสดงปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ฉีดเข้าห้องทดสอบ เพื่อให้ได้ ความเข้มข้นต่างๆ.....	69
ตารางที่ 3.3	ตารางแสดงการจัดเก็บวัสดุตัวอย่างจากห้องทดสอบ.....	70
ตารางที่ 4.1	ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ.....	73
ตารางที่ 4.2	ผลการตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในพื้นที่ศึกษา.....	78
ตารางที่ 4.3	ตารางเปรียบเทียบผลการตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในพื้นที่ศึกษา และจากข้อมูล การตรวจวัดของ กรมควบคุมมลพิษ.....	79
ตารางที่ 4.4	แสดงลักษณะทั่วไปของเครื่อง MultiRAE.....	82
ตารางที่ 4.5	ข้อจำกัดของช่วงการวัดของก๊าซแต่ละชนิด ของเครื่อง MultiRAE.....	83
ตารางที่ 4.6	การจำแนกวัสดุที่เหมาะสมของท่อเก็บตัวอย่างก๊าซและวัสดุกรอง.....	84
ตารางที่ 4.7	แสดงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจวัดภายใน และภายนอกห้องทดสอบ.....	88
ตารางที่ 4.8	ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้โดยเครื่อง MULTIRAE IR จากการ เตรียมก๊าซที่มีความเข้มข้นต่างๆ.....	89
ตารางที่ 4.9	แสดงปริมาณน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างที่หายไปหลังการสัมผัส ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ ความเข้มข้นต่างๆ.....	90

ตารางที่ 4.10	แสดงความหนาแน่นของวัสดุตัวอย่าง.....	91
ตารางที่ 4.11	แสดงองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่างก่อนการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่วิเคราะห์ พบโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	92
ตารางที่ 4.12	แสดงองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่างหลังการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่วิเคราะห์ พบโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	104
ตารางที่ 4.13	แสดงองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่างก่อนและหลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น.....	102
ตารางที่ 4.14	แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้น ต่างๆ.....	113
ตารางที่ 4.15	แสดงค่าเฉลี่ยมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ที่เกิดขึ้นในแต่ละสัปดาห์ ระยะ เวลาสัปดาห์ที่ 1-10.....	115
ตารางที่ 4.16	แสดงค่าทางสถิติเปรียบเทียบตัวแบบในการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	116
ตารางที่ 4.17	แสดงค่าทางสถิติของวัสดุตัวอย่าง.....	117
ตารางที่ 4.18	แสดงค่าการถดถอยของอิฐเก่า.....	119
ตารางที่ 4.19	แสดงค่าการถดถอยของอิฐปัจจุบัน.....	120
ตารางที่ 4.20	แสดงค่าการถดถอยของปูนปั้นเก่า.....	120
ตารางที่ 4.21	แสดงค่าการถดถอยของปูนปั้นปัจจุบัน.....	121
ตารางที่ 4.22	เปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนและความลึกของการกัดกร่อน ระหว่างบริเวณพื้นที่จัดงานอุทยานมรดกโลก กับบริเวณพื้นที่ทั่วไป.....	125
ตารางที่ 4.23	แสดงเปอร์เซ็นต์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในช่วงเวลา ต่างๆ ของวัสดุตัวอย่าง	127

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเอกราชซึ่งไม่เคยตกเป็นเมืองขึ้นของชาติใด ทำให้ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีภาษา วัฒนธรรม และประเพณี เป็นของตนเอง โดยเฉพาะในการแสดงออกในด้าน ศิลปะวัฒนธรรม และสถาปัตยกรรมต่างๆ เช่น โบราณวัตถุ โบราณสถาน ซึ่งนอกจากจะเป็นมรดกทางวัฒนธรรมของชาติไทยแล้ว นอกจากนี้ยังเป็นมรดกของโลก เช่น ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา คณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการศึกษาวิทยาศาสตร์และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ (UNESCO) ได้ประกาศให้อุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาเป็นมรดกโลก เมื่อวันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2534 ณ กรุงคาร์เธจ ประเทศตูนีเซีย นอกจากนี้ยังเป็นร่องรอยแห่งอดีตกาลที่บ่งบอกถึงวิถีชีวิตและความเป็นมา การต่อสู้ของบรรพบุรุษชาติไทย ซึ่งสิ่งเหล่านี้เราไม่สามารถที่จะสร้างขึ้นใหม่ให้เหมือนเดิม หรือหาสิ่งอื่นมาทดแทนได้ ประเทศไทยนั้นมีโบราณสถานอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ปัจจุบันโบราณสถานเหล่านี้กำลังถูกทำลาย นั่นคือมีสภาพทรุดโทรม เนื่องจากผ่านกาลเวลามานานหลายร้อยปี และล้วนแต่ตั้งอยู่บริเวณกลางแจ้งจึงทำให้เกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว ทั้งจากการกระทำของสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ วิธีการอนุรักษ์เป็นปัญหาใหญ่ที่ก่อให้เกิดการถกเถียงระหว่าง นักวิชาการและผู้ปฏิบัติอยู่เสมอ เพื่อเป็นการสนับสนุนการพิจารณาเลือกสรรวิธีการที่เหมาะสมในการอนุรักษ์ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อหาสาเหตุ และกระบวนการแท้จริงที่ทำให้โบราณสถานเกิดการชำรุดทรุดโทรม เพื่อที่จะสามารถพิจารณาหาวิธีการแก้ไข และวิธีป้องกันที่เหมาะสมต่อไป การกัดกร่อนก็เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโบราณสถาน และยังสามารถเกิดได้ในหลายๆ สาเหตุ สาเหตุหนึ่งที่สำคัญและเกิดจากก๊าซมลพิษที่มนุษย์เป็นผู้ปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำในบรรยากาศไม่ว่าในรูปของความชื้นหรือน้ำฝนจะเกิดเป็นกรดซัลฟูริก ซึ่งกรดเหล่านี้สามารถกัดกร่อนวัตถุทุกชนิด โดยจะพบปริมาณมากในเขตบริเวณที่มีการจราจรคับคั่ง หรือมีโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก นั้นหมายถึงโบราณสถานที่ตั้งอยู่ในย่านที่มีการจราจรที่คับคั่ง หรือในย่านของโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ย่อมมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนสูงตามไปด้วย โดยทั้งนี้ระดับของความรุนแรงที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโบราณสถานจากปัญหามลภาวะทางอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษ และระยะเวลาที่ได้รับหรือสัมผัสสารมลพิษ หากได้รับสารมลพิษที่มีความเข้มข้นสูงแม้จะได้รับในระยะเวลาสั้นๆ ก็ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้มาก หรือหากได้รับ

สารมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำแต่ได้รับหรือสัมผัสสารมลพิษเป็นระยะเวลาานาน ก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายได้มากเช่นกัน

จากเหตุผลข้างต้นนี้จะเห็นได้ว่าการกีดกรองนโดยก๊าซมลพิษนั้นมีความสำคัญ และนับวันจะเพิ่มความรุนแรงมากยิ่งขึ้น แต่ในปัจจุบันนี้ในประเทศไทยเอง อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบอัตราการกีดกรองนโดยก๊าซมลพิษในอากาศโดยตรงนั้นยังไม่มี และในการศึกษาการกีดกรองน การทำการทดลองในสภาพแวดล้อมจริงนั้นจะต้องใช้เวลาในการทดลอง และประเมินผลค่อนข้างนาน อาจเป็นเวลาถึง 10 ปี หรือนานกว่านั้น และจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่รวดเร็วและทันต่อการกีดกรองนที่อาจจะเกิดขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องมือขึ้นมาเพื่อศึกษาการกีดกรองนและอัตราการกีดกรองนที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และได้ใช้การทดสอบการกีดกรองนในสภาวะเร่ง นั่นคือมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารมลพิษให้มากขึ้น และมากกว่าในสภาวะที่เกิดขึ้นจริง เพื่อร่นระยะเวลาของการทดลองลง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) พัฒนารูปแบบในการศึกษา และทดสอบการกีดกรองนวัสดุโดยมลพิษทางอากาศในสภาวะก๊าซ
- 2) เพื่อศึกษาการกีดกรองน และอัตราการกีดกรองนของวัสดุจากแหล่งโบราณสถาน โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ความเข้มข้นต่างๆ
- 3) เพื่อทำนายอัตราการกีดกรองนของโบราณสถาน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ทำการทดลองศึกษาการกีดกรองนด้วยเครื่องมือที่ทำการพัฒนา
- 2) วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย
 - (1) วัสดุตัวแทนของโบราณสถาน ได้แก่ อิฐเก่า ขนาดประมาณ 2.5 x 2.5 x 2.5 เซนติเมตร และปูนปั้นเก่า ขนาดประมาณ 2.5 x 2.5 x 2.5 เซนติเมตร จากโบราณสถาน บริเวณเกาะเมือง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
 - (2) วัสดุเปรียบเทียบ ได้แก่ อิฐปัจจุบัน ขนาดประมาณ 2.5 x 2.5 x 2.5 เซนติเมตร และ ปูนปั้นปัจจุบัน ขนาดประมาณ 2.5 x 2.5 x 2.5 เซนติเมตร
 - 3) พื้นที่ศึกษา ได้แก่ วัดพระราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

4) ก๊าซมลพิษ ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

5) วิธีการศึกษาการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน มี 4 วิธี ได้แก่ การตรวจสอบลักษณะภายนอกด้วยตา, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM), การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) และการชั่งน้ำหนักหายน้ำหนักที่หายไป (weight loss)

ตารางที่ 1.1 แสดงวิธีการศึกษาการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนในงานวิจัย

สิ่งที่ศึกษา	วิธีการศึกษา	วัตถุประสงค์
ตรวจสอบลักษณะภายนอกด้วยตา	กล้องถ่ายภาพ	ศึกษาการกัดกร่อน
โครงสร้างภายใน	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
องค์ประกอบวัสดุ	X-ray diffraction	
น้ำหนักที่หายไป (weight loss)	เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง	ศึกษาอัตราการกัดกร่อน

6) เก็บตัวอย่างของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในพื้นที่ศึกษา โดยวิธีพาราโรซานิลีน pararosaniline method

1.4 การดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนได้แก่

- 1) รวบรวมข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น ได้แก่
 - (1) แหล่งโบราณสถาน
 - (2) วัสดุของโบราณสถาน ได้แก่ ชนิด และคุณสมบัติของวัสดุ
 - (3) บรรยากาศภาวะแวดล้อมในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของ SO_2
 - (4) การกัดกร่อน
 - (5) วิธีการศึกษาการกัดกร่อน
- 2) ออกแบบเครื่องมือในการศึกษาการกัดกร่อน
 - (1) ศึกษาสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณและออกแบบเครื่องมือ
 - (2) ออกแบบเครื่องมือในการทดสอบการกัดกร่อน
 - (3) สถิติที่เกี่ยวข้อง

3) ทดสอบเครื่องมือที่พัฒนา

ทำการเตรียมเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เตรียม อุณหภูมิ ความดัน และความชื้น และทำการทดสอบเครื่องมือโดยทดสอบภายนอกอาคาร และใช้อิฐปัจจุบันเป็นตัวทดสอบผลการทดลองจากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งผลการทดลองที่ได้ควรจะต้องมีความสอดคล้องกับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ทดลองด้วยความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ

4) ทดสอบกับวัสดุจริง ค่าของตัวแปรอิสระที่ศึกษามีดังนี้

ตารางที่ 1.2 แสดงค่าของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย

ตัวแปรอิสระที่ศึกษา	ความเข้มข้นของ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	ระยะเวลาในการสัมผัส (สัปดาห์)
ค่าที่ศึกษา	50, 100, 200, 400, 800	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

5) ทำการรวบรวมข้อมูลผลการทดลองดูการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น และหาอัตราการกัดกร่อน

6) ตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ในพื้นที่ศึกษา เพื่อนำมาทดลองหาความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนที่ได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือ ในการศึกษาการกัดกร่อนที่เกิดจากมลพิษทางอากาศ ในสภาวะก๊าซต่อไป

2) การปรับปรุงแบบจำลองที่ผสมผสานลักษณะของการได้รับผลกระทบทางอากาศ ลักษณะของความเข้มข้นของมลสาร และระยะเวลาที่ได้รับมลสาร ทำให้สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าถึงอัตราการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นจากมลพิษในบรรยากาศต่อโบราณสถานต่างๆ ได้

3) เมื่อสามารถคาดการณ์อัตราการกัดกร่อนได้ ก็สามารถนำไปสู่การจัดการที่เหมาะสม เพื่อการอนุรักษ์ และรักษาโบราณสถานให้มีอายุยาวนานที่สุด

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

โบราณสถาน หมายถึง อสังหาริมทรัพย์ ซึ่งโดยอายุ หรือโดยลักษณะแห่งการก่อสร้าง หรือโดยหลักฐานเกี่ยวกับประวัติของอสังหาริมทรัพย์นั้น เป็นประโยชน์ และมีคุณค่าทางด้านศิลปะ ประวัติศาสตร์ และโบราณคดี ตามเกณฑ์โดยทั่วไปจะต้องมีอายุเก่ากว่า 100 ปีขึ้นไป

อิฐ หมายถึง อิฐมอญ หรือก้อนวัตถุที่อัดขึ้นทำจากดินเหนียวหรือดินดาน ตามปกติทำเป็นก้อนสี่เหลี่ยม ขณะที่ยังมีสภาพเหนียวสามารถปั้นได้ แล้วเอาเข้าอบหรือเผาในเตา

อิฐปัจจุบัน หมายถึง อิฐมอญซึ่งทำการผลิตในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปี พ.ศ.2547

อิฐเก่า หมายถึง อิฐมอญซึ่งมีอายุมากกว่า 100 ปี ในงานวิจัยนี้ใช้อิฐซึ่งผลิตในสมัย อยุธยา บริเวณวัดพระราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ปูนปั้น หมายถึง ปูนชนิดหนึ่ง ทำด้วยปูนขาวผสมทรายละเอียด น้ำกาบแห้ง และน้ำเชื้อน้ำตาล ใช้ปั้นรูปต่างๆ เช่น หน้าบัน ลายกระหนก หัวนาค ประดับตามอาคารหรือสิ่งก่อสร้าง

ปูนปั้นปัจจุบัน หมายถึง ปูนปั้นซึ่งทำการผลิตในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปี พ.ศ.2547

ปูนปั้นเก่า หมายถึง ปูนปั้นซึ่งมีอายุมากกว่า 100 ปี ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนปั้นซึ่งผลิตในสมัย อยุธยา บริเวณวัดพระราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

การกัดกร่อน หมายถึง การที่วัสดุทำปฏิกิริยากับบรรยากาศแวดล้อมแล้วทำให้สูญเสียเนื้อของวัสดุ หรืออาจเกิดเป็นสารประกอบอื่น แล้วมีสภาพสูญเสียไป

อัตราการกัดกร่อน หมายถึง ปริมาณการสูญเสียเนื้อของวัสดุต่อเวลา

ห้องทดสอบ (testing chamber) หมายถึง ห้องที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่าง โดยสามารถกำหนดค่ามวลสารที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

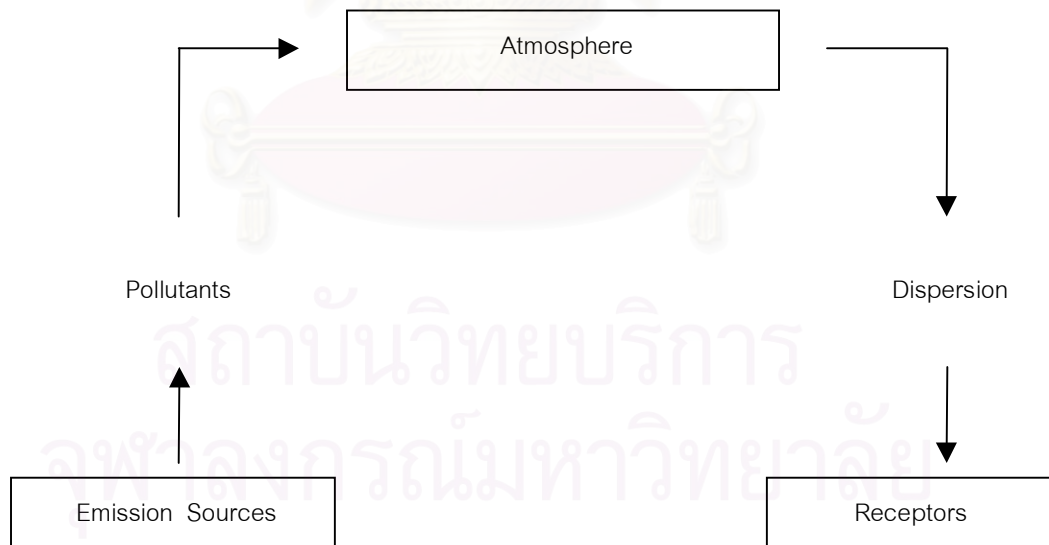
บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัย

2.1 มลพิษทางอากาศ

ภาวะมลพิษทางอากาศ (Air Pollution) หมายถึง ภาวะของอากาศ ซึ่งมีสารเจือปนอยู่ในปริมาณที่มากพอ และเป็นระยะเวลาที่นานพอ ที่จะทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของคน สัตว์ พืช และวัสดุต่างๆ สารที่กล่าวถึงอาจเป็นธาตุหรือสารประกอบ อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ อาจจะอยู่ในรูปของ ก๊าซ หยดของเหลว หรืออนุภาคของแข็งก็ได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2538) สารมลพิษทางอากาศหลักที่สำคัญ คือ ฝุ่นละออง, ก๊าซโอโซน, ตะกั่ว, ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน

ระบบภาวะมลพิษทางอากาศ (Air Pollution System) ประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนที่มีความสัมพันธ์กัน คือ แหล่งกำเนิดสารมลพิษทางอากาศ (Emission Sources) อากาศ หรือบรรยากาศ (Atmosphere) และผู้รับผลเสีย หรือผลกระทบ (Receptors) ดังแสดงเป็นแผนภูมิความสัมพันธ์ ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบภาวะมลพิษทางอากาศ (Air Pollution Systems)

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2538)

2.2 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นก๊าซชนิดหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นก๊าซมลพิษที่สำคัญซึ่งก่อให้เกิดปัญหาภาวะมลพิษทางอากาศ เนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อให้เกิดผลเสียหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นผลต่อมนุษย์ สัตว์ พืช ตลอดจนวัสดุสิ่งก่อสร้างต่างๆ

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

สารประกอบของซัลเฟอร์ที่สามารถพบในบรรยากาศมีอยู่ 3 ชนิด คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) ในรูปของละออง (aerosol) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างสาร 3 ชนิดนี้พบว่า ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีความสำคัญที่สุด (พิมล และชัยวัฒน์, 2525) ซึ่งนอกจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์แล้ว เมื่ออยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นเพียงพอจะสามารถเปลี่ยนเป็นสารที่มีฤทธิ์เป็นกรดทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ และพืชผลทางการเกษตร

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ ไม่ระเบิด ไม่มีสี มีกลิ่นเหมือนกรด มีจุดเดือดที่ -10 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ถ้ามีความเข้มข้นของก๊าซถึง 0.3 - 1 ส่วนในล้านส่วน และจะเริ่มได้กลิ่นถ้ามีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถึง 3 ส่วนในล้านส่วน โดยจะมีกลิ่นฉุนแสบจมูก (วรารุณ, 2542) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศ ประมาณ 2 ใน 3 ของทั้งหมดมาจากแหล่งกำเนิดธรรมชาติ จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากการเผาเปื้อยของสารอินทรีย์ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ โดยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic bacteria) และที่เหลืออีก 1 ใน 3 มีแหล่งกำเนิดจาก การกระทำของมนุษย์โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน และน้ำมันปิโตรเลียม

โดยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

คุณสมบัติ	คุณค่า
สูตรโมเลกุล	SO ₂
รูปเหมือน	Sulfurous anhydride, sulfurous oxide, sulfur oxide, sulfurous acid anhydride
น้ำหนักโมเลกุล	64.07
การละลาย	ละลายในน้ำ, แอลกอฮอล์, กรดแอซิติค, กรดซัลฟูริก, อีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม
ความหนาแน่น	2.811 กรัมต่อลิตร
ความดันไอ	3×10^{-3} มิลลิเมตรปรอท ที่ 25 องศาเซลเซียส
ความดันไออิ่มตัว	0.47 lb/ft ³ ที่ 15 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	-72 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	-10 องศาเซลเซียส
การแปลงหน่วย, 1 บรรยากาศ	1 ส่วนในล้านส่วน = 2.6 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร = 0.38 ส่วนในล้านส่วน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Hazardous Substances Data Bank (2000).

2.2.2 แหล่งกำเนิดของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

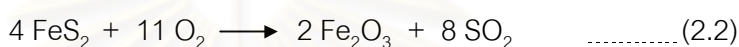
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศมาจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง คือ จากการกระทำของมนุษย์ และแหล่งธรรมชาติ (พิมลและชัยวัฒน์ , 2525) ดังนี้

1) แหล่งกำเนิดจากการกระทำของมนุษย์ เกิดจากการเผาไหม้ของซัลเฟอร์ที่ปรากฏอยู่ในเชื้อเพลิงที่มาจากปิโตรเลียม และถ่านหิน เนื่องจากเชื้อเพลิงเหล่านี้มีสารประกอบของซัลเฟอร์หรือ กำมะถันปะปนอยู่ ซึ่งถ่านหินจากบางแหล่งนั้นมีปริมาณซัลเฟอร์สูงถึงร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่วน

น้ำมันปิโตรเลียมมีประมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการทั่วไป ดังนี้

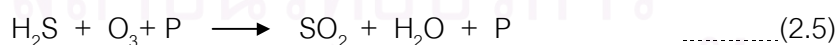
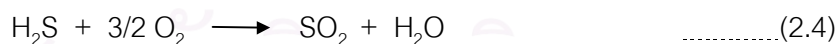
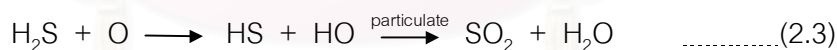


นอกจากนี้ในการเผาไหม้อาจเกิดซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ขึ้นบ้างแต่ก็มีปริมาณไม่มากนัก สำหรับกำมะถันที่เป็นองค์ประกอบในถ่านหินชนิดต่างๆ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเหล็กไพไรต์ (Iron pyrite) ซึ่งมีสูตรทั่วไปเป็น FeS_2 เมื่อเกิดการเผาไหม้ซัลเฟอร์ในเหล็กไพไรต์จะถูกออกซิไดส์ไปเป็น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงได้ดังสมการที่ (2.2)



ซึ่งการประมาณปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระบายออกมา จะประมาณจากปริมาณ ซัลเฟอร์ที่ปรากฏอยู่ในแต่ละเชื้อเพลิง แหล่งกำเนิดจากการใช้เชื้อเพลิงที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่ง นั่นคือ อุตสาหกรรมถลุงโลหะ เช่น การถลุงตะกั่ว และสังกะสี ซึ่งสินแร่ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของ ตะกั่วที่อยู่ในรูปของตะกั่วซัลไฟด์ (PbS) ส่วนสังกะสีอยู่ในรูปสังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) ระหว่างการถลุงแร่ จึงมีการระบายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้าสู่บรรยากาศด้วย

2) แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เมื่อสารอินทรีย์เกิดเน่าเปื่อยย่อยสลายไปโดยจุลินทรีย์ ประเภทที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic bacteria) จะเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้น ซึ่งสามารถถูก ออกซิไดส์ได้โดย O , O_2 หรือ O_3 ดังนี้

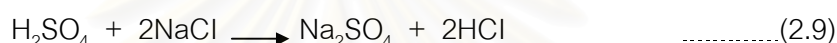
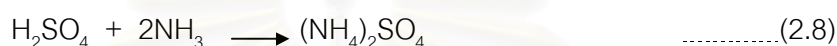


สาร P ในสมการ อาจเป็นอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยในอากาศ เช่น ฝุ่นละออง หรือละอองน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาทั้ง 3 ข้างต้นจะเกิดเร็วขึ้นในบรรยากาศของ Photochemical smog เพราะ O , O_3 และ Particulates มีอยู่ในปริมาณที่เข้มข้นกว่า ครึ่งชีวิต (Half-life) ของซัลเฟอร์ ในบรรยากาศ ประมาณได้เพียง 3 วันเท่านั้น กล่าวคือ ครึ่งหนึ่งของซัลเฟอร์จะถูกขจัดออกไปจาก บรรยากาศในรูปของตะกอนภายใน 3 วัน ถ้าอากาศมีความชื้นเพียงพอซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จะ รวมตัวกับน้ำหรือความชื้นโดยตรง ได้กรดซัลฟูรัสซึ่งแตกตัวให้ HSO_3^- หรือไบซัลไฟท์ ซึ่งจะถูก

ออกซิไดส์ต่อไปเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ได้ไม่ยาก ถ้ามีฝุ่นละอองซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วย ซึ่งแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย (NH_3) หรือเกลือของโลหะ เช่น NaCl เกิดเป็นซัลเฟต (SO_4^{2-}) ได้ดังนี้



กรดซัลฟูริก ซัลเฟต และกรดเกลือที่เกิดขึ้นจะลงสู่ผิวดิน ถ้ามีฝนตกจะทำให้น้ำฝนมีฤทธิ์เป็นกรด หรือเรียกว่า ฝนกรด (Acid rain) นั่นเอง โดยทั่วไปฝนกรดมีช่วงพีเอชอยู่ที่ 2.1 - 5.0 ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งฝนกรดนี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อดิน คือทำให้ดินเปรี้ยว และยังส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2.2.3 ผลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

เนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรด จึงมีผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิต รวมทั้งก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างวัสดุได้ โดยผลกระทบที่เกิดจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ดังนี้

1) ผลต่อการมองเห็น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศเมื่อกลายเป็นซัลเฟต จะมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน โดยมีขนาดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2-0.9 ไมครอน ซึ่งจะมีผลทำให้การมองเห็น (Visibility) ลดลง ถ้าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศมีสูงถึง 0.1 ส่วนในล้านส่วน โดยที่มีความชื้นสัมพัทธ์เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ จะลดการมองเห็นให้เหลือ 5 ไมล์ ซึ่งเป็นอุปสรรคมากต่อการบิน (วรารุช, 2542)

2) ผลต่อสุขภาพ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟูริก ทำให้เกิดอาการแสบจมูกและคอ ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจ มีหลักฐานเพียงพอที่จะเชื่อได้ว่าสารทั้งสองนี้ทำให้ซีเลีย (Cilia) เคลื่อนไหวช้าลงจึงก่อให้เกิดปัญหา เพราะซีเลียทำหน้าที่ขจัดฝุ่นละออง สารที่เป็นพิษ และตัวจุลินทรีย์ จากหลอดลมหายใจ ถ้าสารทั้งสองนี้เข้าสู่ปอด จะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบการ

หายใจ และเป็นพิษทันที (พิมล และชัยวัฒน์, 2525) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีผลต่อสุขภาพเพิ่มขึ้นมากเมื่อปรากฏอยู่ร่วมกับฝุ่น และความชื้นในอากาศ มีการศึกษาถึงผลต่อร่างกายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์กับสัตว์ และได้พบว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลต่อระบบหายใจส่วนบน เมื่อที่มีระดับต่ำกว่า 20 ส่วนในล้านส่วน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลเฉพาะผลเฉียบพลันไม่มีผลเรื้อรัง จากการศึกษาที่สัตว์พบว่า การได้รับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขนาดปานกลางและไม่ต่อเนื่องจะไม่มีผลสะสมใดๆ และจะต้องมีระดับจนถึง 1 ส่วนในล้านส่วน จึงจะเกิดผลกับสุขภาพหรือให้ผลแตกต่างระหว่างคนปกติ

3) ผลต่อพืช ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่อพืช คือ การเกิดฝนกรด ซึ่งจะทำให้ดินมีพีเอช (pH) ต่ำเกินไปกลายเป็นดินเปรี้ยวมีลักษณะไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช และถ้าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพียง 0.03 ส่วนในล้านส่วน ก็สามารถทำความเสียหายแก่ใบไม้ได้ โดยจะไปพอกสีของใบไม้ และทำให้ต้นไม้ล้มตายในที่สุด

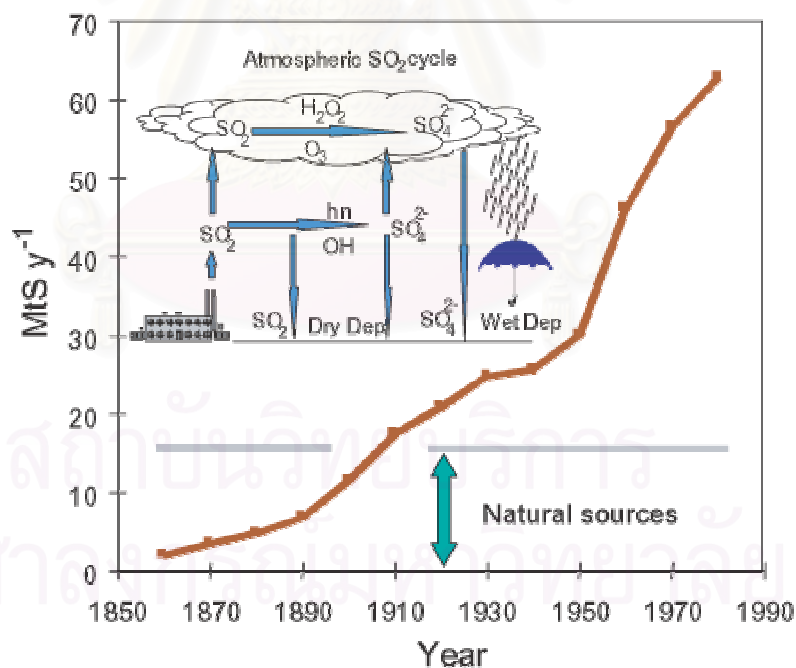
4) ผลต่อวัสดุ และสิ่งก่อสร้าง ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีผลทำให้สิ่งทอที่ทำด้วยผ้าฝ้าย ไนลอน และเรยอน รวมทั้งวัตถุที่ทำด้วยสัตว์และยาง ทั้งยางสังเคราะห์และยางธรรมชาติ เสื่อมคุณภาพ และสีจางลงเร็วกว่าปกติ รวมทั้งสีทาบ้านซีด และลอกออก มีการศึกษาพบว่า ผิวสีจะแห้งช้าลงถ้ามีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปรากฏอยู่ เช่น ถ้าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ 2 ส่วนในล้านส่วน จะทำให้สีแห้งช้าลง 50-100 เปอร์เซ็นต์ และถ้าความเข้มข้นสูงขึ้นถึง 7-10 ส่วนในล้านส่วน จะใช้เวลาเพิ่มเป็น 2-3 วัน และผิวของสีจะไม่มี ความคงทนอีกด้วย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังมีผลต่อการกัดกร่อนโลหะโดยการเปลี่ยนรูปเป็นกรดทั้งในอากาศ และที่ผิวของโลหะ

นอกจากนี้ยังมีผลทำให้สิ่งก่อสร้างที่เป็นหินปูน (Limestone) และหินอ่อน (Marble) ชำรุดและสึกกร่อนได้ เมื่อซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดูดกลืนเข้าไปจะสามารถถูกออกซิไดส์เป็นซัลเฟตได้ และในที่สุดจะเข้าไปแทนที่ คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ในแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) มีความหนาแน่นน้อยกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต จึงเกิดการขยายตัวขึ้นในโครงร่าง (Matrix) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดรอยร้าวและสึกกร่อนในที่สุด ปรากฏการณ์นี้เป็นปัญหามากต่อโบราณวัตถุ อนุสาวรีย์ ประติมากรรม และรูปภาพในพิพิธภัณฑ์ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นความชำรุดทรุดโทรมที่เกิดขึ้นได้ (พิมล และชัยวัฒน์, 2525 อ้างถึงใน สุนิสสา, 2543)

โดยปกติเมื่อเวลาผ่านไปสิ่งปลูกสร้างต่างๆ เช่น รูปปั้นแกะสลัก อนุสาวรีย์ หรืออาคารต่างๆ จะเกิดขบวนการผุพังและสลายตัวตามธรรมชาติอยู่แล้ว ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ในเวนิสความเสียหายที่เกิดขึ้นกับรูปปั้น และอนุสาวรีย์ ส่วนมากจะเกิดจากขบวนการผุพังตามธรรมชาติ และจากน้ำทะเล ไม่ใช่เกิดจากก๊าซจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากเรือยนต์ แต่ก็

ยังเป็นที่น่าสังเกตได้ว่า สารมลพิษเหล่านี้อาจจะทำให้เกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นได้ (Levy, 1998) เนื่องจากสารมลพิษทางอากาศถือเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนของผิววัสดุได้ โดยเฉพาะในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่สามารถตกสะสมที่ผิวของวัสดุแล้วเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนอยู่ในรูปที่มีผลให้วัสดุสึกกร่อนได้

กระบวนการที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกพัดพา และถูกดูดซับบนผิวของหินนั้น เป็นกระบวนการที่เรียกว่า การตกสะสมของกรด (Acid depositon) ซึ่งถ้าเกิดในสภาวะที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบจะเรียกว่า การตกสะสมเปียก (Wet deposition) แต่ถ้าหากเกิดในสภาวะที่ไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบบนผิวหินที่แห้งจะเรียกว่า การตกสะสมแห้ง (Dry deposition) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนผิวของวัสดุและเมื่อผิวหน้าหลุดร่อนไปก็จะสึกกร่อนลึกลงไปเนื้อของวัสดุ (Pollution Control Department, 2001) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ ยังผลทำให้มีผู้สนใจศึกษาถึงผลที่จะเกิดต่อผิววัสดุ โดยเฉพาะหินปูน, ปูนปั้น, ปูนฉาบ, ปูนสอ และหินอ่อน ซึ่งล้วนมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนประกอบหลัก และเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในงานศิลปะต่างๆ โดยการคำนึงถึงผลกระทบที่จะเกิดต่อโบราณสถาน และโบราณวัตถุต่างๆ



รูปที่ 2.2 Annual emissions of sulfur dioxide (as millions of tonnes of sulfur, MtS) and the atmospheric sulfur dioxide cycle.

ที่มา : CSIRO (2001)

จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษพบว่า การลดความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศจาก 0.15 ส่วนในล้านส่วน ลงไปที่ 0.05 ส่วนในล้านส่วน จะสามารถลดอัตราการกัดกร่อนของสังกะสีลงได้ 4 เท่า ส่วนอนุภาคนิยมค่อนข้างจะคงทนต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ อัตราของการกัดกร่อนจะเพิ่มสูงขึ้น (Pollution Control Department, 2000) และจากรายงานผลการศึกษาของโครงการ Atmospheric Corrosion-Organic Coatings โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ.2537 ซึ่งเป็นการศึกษาสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม ในบรรยากาศที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ นั้น พบว่าการสึกกร่อนของวัสดุต่างๆ ในบรรยากาศ โดยดูจากอัตราการสึกกร่อนในปีแรกในเขตพื้นที่ต่างๆ พบว่ามีอัตราการสึกกร่อนจากมากไปน้อย คือ เขตชายทะเล เขตอุตสาหกรรม เขตเมือง เขตชนบท ตามลำดับ และยังพบอีกด้วยว่าอัตราการสึกกร่อนเฉลี่ยของวัสดุในปีที่ 2 จะมีค่าลดลง เนื่องจากการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นในปีแรกนั้น จะทำหน้าที่เสมือนเป็นเกราะป้องกันการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับอากาศต่อไป (สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา, 2539)

2.2.4 การวิเคราะห์ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

มลสารของก๊าซในอากาศซึ่งปล่อยออกจากขบวนการผลิต และอุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิง มีหลายประเภทด้วยกัน และยังมีความเข้มข้นในช่วงที่กว้างมาก ตั้งแต่จากหลายเปอร์เซ็นต์จนถึงระดับส่วนในล้านส่วน ซึ่งองค์ประกอบตลอดจนความเข้มข้นของก๊าซเหล่านี้ยังแปรเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็วตามเวลา โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกิจกรรมนั้นๆ จึงต้องมีการคิดค้นหามาตรการการเก็บตัวอย่างที่เหมาะสม โดยพยายามให้ตัวอย่างอากาศที่เก็บได้เป็นตัวแทนที่ถูกต้องของแหล่งเกิดมลสารนั้น

วิธีการวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศมีหลายวิธีด้วยกัน โดยจะขอกล่าวสรุปเป็นหลักการ ดังตารางที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

วิธีวิเคราะห์		ขอบข่าย	หลักการวิเคราะห์	สิ่งรบกวน
วิธีอย่างต่อเนื่อง	วิธีคอนดักโตเมตริก	ประมาณ 50 ถึง 10,000 ppm	นำตัวอย่างก๊าซไปสัมผัสกับสารละลายทำปฏิกิริยาในอัตราส่วนผสมที่คงที่ เพื่อให้เกิดการดูดกลืนอย่างสมบูรณ์ โดยวัดผลต่างของความนำไฟฟ้าก่อนและหลังการดูดกลืน	ความคลาดเคลื่อนด้านบวกหรือลบ เกิดได้จากสารที่ละลายได้ ในสารละลายดูดกลืน แล้วแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้า
	วิธีวิเคราะห์ก๊าซแบบ IR	0 ถึง 1,000 ppm	วัดความเข้มข้นของ SO ₂ โดยเครื่องวิเคราะห์แบบ Nondispersive Infrared ซึ่งใช้ประโยชน์แบนด์ดูดกลืนของ SO ₂ ในย่าน IR	ความชื้นก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนด้านบวก
วิธีหลอดซีบอก (Indicator Tube)		ประมาณ 20 ถึง 3,000 ppm (เป็นวิธีที่สะดวกสำหรับการประมาณคร่าวๆ)	ส่งตัวอย่างก๊าซปริมาณแน่นอนผ่านหลอดซีบอก SO ₂ เพื่อวัดความเข้มข้นจากความยาวของชั้นที่ติดสีขึ้น	สารประกอบที่รีดิวซ์ (ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ฯลฯ) ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนด้านบวก

ที่มา : ศิริกัลยา และคณะ (2542)

2.3 คุณภาพอากาศและค่ามาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ในบรรยากาศโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบของก๊าซต่างๆ อยู่แล้วในธรรมชาติเกิดขึ้นในสัดส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน เป็นต้น โดยองค์ประกอบของก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศบริสุทธิ์แสดงได้ดังตารางที่ 2.3 แต่เนื่องจากกิจกรรมต่างๆ ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อการคมนาคม การหุงต้ม และให้ความร้อน รวมทั้งการใช้เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมเพื่อการผลิตต่างๆ กิจกรรมเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดสารมลพิษขึ้นสู่บรรยากาศได้ทั้งสิ้น

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของอากาศบริสุทธิ์แห่งที่ระดับน้ำทะเล

องค์ประกอบ	ร้อยละ	ส่วนในล้านส่วน (ppm)
ไนโตรเจน	78.09	780,900
ออกซิเจน	20.94	209,400
อาร์กอน	0.93	9,30
คาร์บอนไดออกไซด์	0.0318	318
นีออน	0.0018	18.0
ฮีเลียม	0.00052	5.2
คริปทอน	0.0001	1.0
ซีนอน	0.000008	0.08
ไนตรัสออกไซด์	0.000025	0.25
ไฮโดรเจน	0.00005	0.5
มีเทน	0.0015	1.5
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0.0000001	0.01
โอโซน	0.000002	0.02
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.00000002	0.0002
คาร์บอนไดออกไซด์	0.00001	0.1
แอมโมเนีย	0.000001	0.1

ที่มา : American Chemical Society (1969) (อ้างถึงใน วงศ์พันธ์, นิตยา และธีระ, 2536)

2.3.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย

มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไป เป็นเป้าหมายระดับคุณภาพอากาศ (Air Quality Goals) ที่ต้องการ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของความเข้มข้นเฉลี่ยของสารมลพิษแต่ละชนิดที่ยอมให้มีได้ในบรรยากาศในช่วงระยะเวลาที่กำหนดไว้ ซึ่งกำหนดโดยใช้ข้อมูลและผลการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งบ่งบอกถึงผลเสียหายและอันตรายของสารมลพิษแต่ละชนิด หากสัมผัสกับสารมลพิษนั้นๆ ที่ระดับความเข้มข้น และระยะเวลาสัมผัสต่างๆ กันเป็นพื้นฐานหลัก และอาจใช้ปัจจัยอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น ปัจจัยทางเทคโนโลยี และปัจจัยทางเศรษฐกิจ เป็นต้น ดังนั้นมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศจะต้องมีการได้รับการทบทวน และปรับปรุงให้เหมาะสมกับสถานการณ์เป็น

ระยะๆ ในปี พ.ศ. 2538 กรมควบคุมมลพิษได้ทำการปรับปรุงมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย โดยได้มีการปรับเปลี่ยนค่ามาตรฐานสำหรับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และตะกั่วให้เข้มงวดขึ้น และเพิ่มเติมค่ามาตรฐานสำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.4 ทั้งนี้ เป็นการกำหนดตามมาตรา 32 ของพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ซึ่งกำหนดให้การกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไป จะต้องอาศัยหลักวิชาการ กฎเกณฑ์ และหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ เป็นพื้นฐาน และจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐกิจ สังคม และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องด้วย

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย (2538)

สารมลพิษ *	ค่าเฉลี่ย 1 ชม.		ค่าเฉลี่ย 8 ชม.		ค่าเฉลี่ย 24 ชม.		ค่าเฉลี่ย 1 เดือน		ค่าเฉลี่ย 1 ปี **		วิธีการตรวจวัด
	mg.m ⁻³	ppm	mg.m ⁻³	ppm	mg.m ⁻³	ppm	mg.m ⁻³	ppm	mg.m ⁻³	ppm	
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	34.2	30	10.26	9	-	-	-	-	-	-	Non-Dispersive Infrared Detection
ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)	0.32	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-	Chemiluminescence
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	0.78	0.30	-	-	0.30	0.12	-	-	0.10	0.04	UV-Fluorescence
ปริมาณอนุภาคแขวนลอยรวม (TSP)	-	-	-	-	0.33	-	-	-	0.10	-	Gravimetric-High Volume
อนุภาคฝุ่น (PM-10)	-	-	-	-	0.12	-	-	-	0.05	-	Gravimetric-High Volume
โอโซน (O ₃)	0.20	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	Chemiluminescence
ตะกั่ว (Pb)	-	-	-	-	-	-	1.5	-	-	-	Atomic Absorption Spectrometer

หมายเหตุ * ค่าความเข้มข้นของก๊าซ คำนวณที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

** ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

/a ค่ามาตรฐาน SO₂ เฉลี่ย 1 ชั่วโมง - 1,300 µg.m⁻³ สำหรับพื้นที่แม่เกาะ

- 780 µg.m⁻³ สำหรับบริเวณอื่นๆ ทั่วไป

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2543)

2.3.2 มาตรฐานการระบายสารมลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรมทำการกำหนดความเข้มข้นของสารมลพิษชนิดต่างๆ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2536 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน สำหรับสารมลพิษจำนวน 15 ชนิด โดยห้ามใช้วิธีเจือจาง และให้คำนวณเปรียบเทียบกับความดัน 1 บรรยากาศ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานการระบายสารมลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ความดัน 1 บรรยากาศ และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ประเภทสารมลพิษ	แหล่งที่มาของสารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน (mg.m ⁻³)
1. ผุ่นละออง	หม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้ - น้ำมันเตา - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงต่าง ๆ การถลุงหลอม รีดดิ่ง และผลิตเหล็กกล้า อะลูมิเนียม	300 400 400 300
2. พลวง	การผลิตทั่วไป	400
3. สารหนู	การผลิตทั่วไป	20
4. ทองแดง	การหลอมหรือการถลุง	30
5. ตะกั่ว	การผลิตทั่วไป	30
6. คลอรีน	การผลิตทั่วไป	30
7. ไฮโดรเจนคลอไรด์	การผลิตทั่วไป	200
8. พรอท	การผลิตทั่วไป	3
9. คาร์บอนมอนอกไซด์	การผลิตทั่วไป	1,000 (870 ppm)
10. กรดกำมะถัน	การผลิตทั่วไป	100 (25 ppm)
11. ไฮโดรเจนซัลไฟด์	การผลิตทั่วไป	140 (100 ppm)
12. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	การผลิตกรดซัลฟิวริก การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ใช้น้ำมันเตา*	1,300 (500 ppm) 1,250 ppm
13. ออกไซด์ของไนโตรเจน (วัดในรูป NO _x)	หม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้ - ถ่านหิน - เชื้อเพลิง	940 (500 ppm) 740 (250 ppm)
14. ไซลีน**	การผลิตทั่วไป	870 (200 ppm)
15. ครีซอล	การผลิตทั่วไป	22 (5 ppm)

ที่มา: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน 14 ชนิด (ประกาศ ณ วันที่ 20 กรกฎาคม 2536)

- * ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 9 เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานเพิ่มอีก 1 ชนิด (ประกาศ ณ วันที่ 6 กันยายน 2538)
- ** ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานเพิ่ม อีก 1 ชนิด (ประกาศ ณ วันที่ 11 เมษายน 2543) ยกเลิกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 (ประกาศ ณ วันที่ 3 เมษายน 2539)

2.4 อีฐและปูนปั้น

อีฐและปูนปั้น มนุษย์นั้นรู้จักผลิตขึ้นเพื่อนำมาใช้ในทางด้านงานก่อสร้างและประติมากรรมมาเป็นเวลาช้านานมาแล้ว ซึ่งสังเกตได้จากโบราณสถานต่างๆ ทางประวัติศาสตร์ เช่น วัดพระราม วัดพระศรีสรรเพชญ์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา หรือ เจดีย์เก่าอยุธยาโบราณ เป็นต้น

2.4.1 กระบวนการผลิตอีฐ

อีฐเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความแข็งแรงและมีความสำคัญมากที่มนุษย์รู้จักนำมาใช้ ตั้งแต่สมัยโบราณหลายพันปีมาแล้ว และยังคงใช้มาจนถึงปัจจุบัน อีฐในสมัยโบราณนั้นทำมาจากดินเหนียว โดยการขึ้นรูปเป็นก้อนอีฐด้วยมือ ซึ่งจะพบว่าอีฐที่ได้นั้นจะมีขนาดที่ไม่เท่ากัน ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการ และนำเทคโนโลยีเข้ามาผสมผสานในกระบวนการผลิต ตลอดจนการกำหนดมาตรฐานในการผลิตอีฐทำให้อีฐที่ได้มีมาตรฐานมากขึ้น ขนาดของอีฐจึงประมาณเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าในปัจจุบันนี้ได้มีการผลิตอีฐในรูปของอุตสาหกรรม แต่ก็ยังมีหลายแห่งที่ยังคงกรรมวิธีการผลิตเช่นอดีต

2.4.1.1 วัดฤติบ

1) วัดฤติบสำคัญที่ใช้ในการผลิตอีฐมอญ ประกอบด้วย

(1) ดินเหนียวปนทราย เป็นดินที่มีสีน้ำตาลอ่อน สีน้ำตาลแก่ และสีเทาแก่ เม็ดละเอียด จะต้องมีความเหนียวพอที่จะทรงตัวอยู่ได้ ทั้งในขณะที่เปียกและแห้ง ไม่ยุบตัวแตกสลาย ถ้าเหนียวมากเกินไปดินจะหดตัวมากต้องใช้วัสดุอื่นผสม เช่น ทราย แกลบ เพื่อให้ความเหนียวพอดี และมีความหดตัวน้อย

(2) แกลบ แกลบเป็นวัสดุผสมที่ใช้ผสมกับดินเหนียว เพื่อลดความเหนียว และทำให้อีฐมีน้ำหนักเบา ป้องกันการแตกร้าว การหด หรือบิดตัวของอีฐ เมื่อทำการเผาแกลบที่ผสมก็จะเผาไหม้ ช่วยทำให้อีฐสุกเร็ว และเปลืองเชื้อเพลิงน้อย เนื้ออีฐมีรูพรุนสามารถดูดน้ำได้มาก การดูดน้ำของอีฐ จะทำให้ไม่ลื่นเปลืองปูนสอ และปูนจะเกาะแผ่นอีฐติดแน่นดี การใช้แกลบผสม

แตกต่างกันไปตามความนิยมของแต่ละท้องถิ่น อีฐุมอญจะใช้แถบผสม ประมาณ 15-25 กิโลกรัมต่ออีฐ 1,000 ก้อน

(3) ทราย ทรายใช้ผสมกับดินเหนียว เมื่อดินมีความเหนียว และหดรตัวมาก ทรายจะเพิ่มความแข็งแรงรับน้ำหนักได้ดี การผสมทรายในปริมาณพอเหมาะจะช่วยป้องกันการหดตัว การแตกร้าว และการบิดตัว เมื่อเผาถ้าผสมทรายมากเกินไปจะทำให้ลายความเชื่อมั่นของอีฐ อีฐจะเปราะหักง่าย การใช้ทรายผสมดินเหนียวนั้นไม่จำเป็นเสมอไป ถ้าหากเป็นดินเหนียวที่มีคุณภาพเหมาะสำหรับผลิตอีฐ (Marl Clay) แล้วไม่ต้องใช้ทรายผสมเลย

2) คุณสมบัติของดินเหนียวและส่วนผสมของสารในดิน

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตอีฐมอญโดยตรง คือ ดินเหนียว ดังนั้นก่อนที่จะนำดินเหนียว มาผลิตควรพิจารณาในเรื่อง ดังต่อไปนี้

(1) ดินที่จะนำมาใช้ในการผลิตอีฐจะต้องไม่เหนียวเกินไป หรือเป็นดินที่มีทรายปนอยู่มากเกินไป และไม่มีกรวดปน ดินที่จะผลิตอีฐได้ดีต้องเป็นดินเหนียวที่มีทรายปนอยู่ตามอัตราที่เหมาะสม จะช่วยทำให้อีฐคงรูปอยู่ได้ ถ้ามีทรายปนเกินกว่าร้อยละ 25 แล้วจะทำให้อีฐเปราะไม่แข็งแรง

(2) ตามปกติ ดินที่จะนำมาใช้ผลิตอีฐควรเป็นดินที่ขุดลึกลงไปจากหน้าดินประมาณ 1-2 เมตร แต่ดินที่ขุดตื้นกว่านี้นั้นอาจจะใช้ได้ถ้าสามารถนำมาผสม และนวดจนเนื้อดินละเอียดเหนียวได้

(3) ทางด้านวิชาการนั้น ส่วนผสมของสารในดินที่ใช้ทำอีฐที่ดีจะต้องมีดินเหนียวแท้ๆ ร้อยละ 60 ทรายร้อยละ 20 และแร่ธาตุอื่น เช่น หินปูน เหล็กออกไซด์ แมกนีเซียม ปูนขาว ฯลฯ อีกร้อยละ 20

3) คุณสมบัติของส่วนผสมต่างๆ

มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป สามารถอธิบายได้ดังนี้

(1) ดินเหนียว มีคุณสมบัติช่วยให้เม็ดดินเกาะกันเป็นก้อนได้คงที่ในระหว่างที่ยังเป็นอีฐดิบ (อีฐที่ยังไม่เผา)

(2) ทราย มีคุณสมบัติป้องกันการร้าว การหด และการบิดตัว

(3) แร่ธาตุอื่นๆ จะช่วยในการแปรสภาพของสารในดิน ในขณะที่ถูกความร้อนเผาให้สุก สำหรับพวกออกไซด์จะช่วยให้อีฐมีสีต่างๆ เมื่อเผาจนสุกแล้ว โดยแร่ธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่ในดินเหนียว ได้แก่

(3.1) ธาตุปูน (Carbonate of lime) ถ้ามีอยู่ในดินเหนียว มากๆ เมื่ออิฐที่เผาแล้วถูกน้ำจะแตกแยกออกจากกัน

(3.2) ธาตุซิลิเกต (Silicate of Lime) หรือ ปูนขาวซิลิเกต ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้อิฐบดงอ เสียรูปเมื่อเผา

(3.3) ธาตุแมกนีเซียม (Magnesium) ถ้ามีน้อยก็ไม่ให้ผล ใดๆ เพียงแต่ทำให้อิฐมีสีน้ำตาล บางที่ใช้เติมในดินเหนียวทำให้แข็งแรง ใช้ทำกระเบื้องปูพื้น ปูทางเท้าและเฉลียง

(3.4) ทราย (Sand) ถ้ามีผสมอยู่เกินกว่าร้อยละ 25 จะ ทำให้อิฐเปราะไม่แข็งแรงหักง่าย

(3.5) สนิมเหล็ก (Iron Oxide) และ ซัลไฟด์ของเหล็ก (Sulphide of Iron) ถ้าพบว่ามีอยู่ในดินเหนียวเกินกว่าร้อยละ 2-3 ก็ไม่เหมาะสำหรับผลิตอิฐทนไฟ (Fire brick) สนิมเหล็ก หรือ เหล็กออกไซด์ทำหน้าที่เป็นวัสดุผสม (flux) เพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงให้กับอิฐ ทำให้อิฐมีสีแดง เป็นสัดส่วนกับปริมาณเหล็กออกไซด์ปูนขาว หรือธาตุซิลิเกต และ ถ้าหากมีมากกว่าสนิมเหล็ก อิฐจะมีสีเหลืองและหดตัวมาก

4) ดินที่ใช้ในการผลิตอิฐ

การแบ่งชนิดของดินเหนียวที่ใช้ในการผลิตอิฐ แบ่งออกตามส่วนประกอบ ทางเคมีและฟิสิกส์ ส่วนประกอบทางเคมีมีผลทำให้อิฐมีคุณภาพและสีต่างๆ กัน ซึ่ง แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

(1) ดินสำหรับผลิตอิฐ โดยธรรมชาติ (Marl or Calcareous Clays) เป็นดินที่มีปูนขาว (Lime) ปนอยู่โดยธรรมชาติเป็นส่วนมาก ดินประเภทนี้เป็นดินที่เหมาะสมสำหรับผลิต อิฐมากที่สุด และไม่จำเป็นต้องเอาวัสดุอื่นๆ ผสมเข้าไปด้วย เมื่อผลิตอิฐสุกแล้วจะมีสีเหลือง หรือ สีอ่อนๆ ละลายเชื่อม แผ่นอิฐอยู่

(2) ดินเหนียวปนทราย (Loame Clay) เป็นดินเหนียวที่มีทรายอยู่ มากบ้างน้อยบ้างตามลักษณะภูมิประเทศ ดินเหนียวปนทรายที่เหมาะสมสำหรับการผลิตอิฐจะต้องมี ทรายผสมอยู่ประมาณไม่เกินร้อยละ 25 และมีปูนขาว (Lime) ปนอยู่บ้างเล็กน้อยแล้วจะช่วยให้อิฐ คงรูปอยู่ได้ ถ้ามีทรายผสมอยู่เกินกว่าร้อยละ 25 แล้ว จะทำให้อิฐเปราะไม่แข็งแรง และเมื่อเผาจะมีสี น้ำตาล

(3) ดินเหนียวแก่ (Plastic or Strong Clay) เป็นดินเหนียวแท้ๆ ที่ทับถมกันอยู่เป็นเวลานาน มีสิ่งอื่นปนอยู่บ้างเล็กน้อย เช่น หินปูน เหล็ก แมกนีเซียม โซดาเกลือ แต่ไม่มีแร่ธาตุจำพวกซิลิกา (ทราย) ผสมอยู่ด้วย มีคุณภาพคล้ายหิน เมื่อเปียกจะเหนียวเหนอะหนะไม่มากนัก ทำให้อิฐมีสีแดง

(4) ดินผสม (Malm) เป็นดินที่ผสมขึ้นโดยใช้ดินเหนียวผสมกับซอลด์

5) วิธีการตรวจสอบดินที่ใช้ในการผลิตอิฐ

วิธีการตรวจสอบว่าดินชนิดใดมีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการผลิตอิฐ หรือไม่ วิธีที่ดีที่สุดคือใช้วิธีเอาดินมาปั้นเป็นก้อนแล้วปล่อยให้แห้งลม หรือตากแดดให้แห้ง ถ้าก้อนอิฐหดตัวและแตกร้าวมาก ต้องเพิ่มส่วนของทรายหรือแกลบผสมเข้าไปอีก ถ้าอิฐยุ่ยหรือเปราะ ก็หมายความว่าทรายผสมอยู่มากเกินไปจะต้องลดจำนวนทรายลง หรือเพิ่มเติมดินเหนียวให้มากขึ้น ถ้าจะให้ได้ผลแน่นอนควรทดสอบโดยการผลิตอิฐ ลองเผา และสังเกตหลังจากดินสุกแล้ว

2.4.1.2 ขั้นตอนในการผลิตอิฐ

ขั้นตอนในการผลิตอิฐนั้น โดยทั่วไปแล้วมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละขั้นตอนอย่างคร่าวๆ ได้ดังต่อไปนี้

- 1) การเลือกดินที่เหมาะสม การเลือกดินเหนียวที่เหมาะสมที่จะผลิตอิฐตามที่กล่าวมาแล้วในเรื่องคุณสมบัติของดิน ดินที่ใช้ในการผลิตอิฐ วิธีการแก้ไขดิน และวิธีการตรวจสอบดิน
- 2) การเก็บ การเก็บดินนั้นจะกองตากลมไว้บริเวณโรงงานผลิตอิฐ ซึ่งการทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติดีขึ้น ควรตากลมไว้ประมาณ 2 ถึง 3 เดือน หรือถึง 2 ปี ก่อน และเมื่อผสมน้ำจะทำให้ดินอ่อนนุ่มดีขึ้น และทำให้ธาตุเกลือบางชนิดระเหยออกไป
- 3) การเตรียมดิน โดยการพ่นดินให้ละเอียดด้วยจอบ คัดเอาสิ่งที่ไม่ต้องการออก เช่น ก้อนกรวด ก้อนหินปนรากไม้ รากหญ้า ซึ่งติดดินออกให้หมด
- 4) การหมักดิน นำดินที่ได้ขึ้นไปเทไว้ในหลุมแช่ดิน ซึ่งใส่ไว้แล้วพอประมาณในอัตราส่วนที่เมื่อผสมดินกับแกลบแล้ว ความเหลวของดินต้องอยู่ในระดับที่สามารถจับตัวกันเป็นแท่งได้ โดยที่เมื่อทิ้งไว้จะไม่เสียรูปทรงไป การที่ต้องหมักหรือแช่ดินนี้เพื่อจุดประสงค์คือให้ดินได้ชุ่มน้ำ จะเปลี่ยนสภาพจากก้อนดินเป็นเนื้อเดียวได้เมื่อได้รับการย่ำหรือนวด (คือการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน)

5) การผสม เมื่อหมักดินไว้ประมาณ 1 คืนแล้วนำทราย แกลบ หรือ ขี้เถ้าแกลบ ผสมลงไป ส่วนผสมของทรายไม่ควรจะมากเกินไปเพราะอิฐจะเปราะง่าย

6) การนวดหรือการย่ำดิน เป็นการนวดดินให้ดินมีความเหนียวสามารถนำไปปั้นเป็นก้อน ซึ่งการใช้เครื่องนวดดินจะทำให้การนวดดินได้ผลดี เพราะดินจะถูกตีจนแตกละเอียดเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน มีความเหนียวดีกว่าดินที่ย่ำโดยใช้แรงงานคน การใช้เครื่องนวดดินสามารถจะผลิตได้เร็วและประหยัดแรงงานคนด้วย เมื่อนำดินออกจากเครื่องนวดก็สามารถนำไปปั้นเป็นก้อนได้ทันที

7) การเก็บหมัก การเก็บดินหมักไว้หลังจากนวด หรือย่ำ ให้นานประมาณ 1-2 วัน จะทำให้คุณภาพของเนื้อดินที่จะปั้นเป็นก้อนดีขึ้น การปั้นอิฐดินจะไม่ติดไม้แบบ หรือจะนำไปปั้น หรือทอดเลยก็ได้

8) การปั้นอิฐดิบหรือการทอดอิฐ การปั้นอิฐส่วนใหญ่ใช้แรงงานคน คือ ปั้นด้วยมือ โดยใช้ตัดดินลงในไม้แบบซึ่งมีขนาดต่างๆ กันออกไปตามขนาดของอิฐที่ต้องการ

วิธีการอัดดิน ผู้ปั้นจะวางแบบลงบนพื้นเรียบ เช่น ไม้กระดาน หรือ พื้นดินที่อัดแน่นรอยด้วยขี้เถ้าแกลบ ภายในไม้แบบจะโรยผงขี้เถ้าแกลบไว้ด้วย เพื่อจะช่วยให้ดินเหนียวติดพื้นหรือติดไม้แบบ ดินที่อัดลงไปในไม้แบบนี้ ผู้ปั้นจะใช้มือจุ่มน้ำแล้วควักดินมาใส่ในไม้แบบที่ละช่องอัดดินให้แน่น ใช้มืออีกข้างปาดดินให้เรียบเสมอกับไม้แบบ ต่อจากนั้นก็ควักดินใส่ในช่องต่อไป อัดให้แน่น ปาดดินให้เรียบ ทำเช่นนี้จนครบทุกช่องในไม้แบบ จากนั้นจึงใช้มือจุ่มน้ำแล้วนำมาลูบที่หน้าดินในไม้แบบให้หน้าดินด้านหน้าจะไม่มีการตกแต่งอีก

9) การผึ่งให้แห้ง เมื่อบั่นดินเหนียวเป็นก้อนอิฐแล้วต้องผึ่งอิฐดิบให้แห้ง วิธีผึ่งมี 2 แบบ คือ

(1) ใช้ผึ่งลม เอาก้อนอิฐดิบวางบนแผ่นไม้รองแล้ววางบนชั้น ให้มีช่องโปร่ง หรือผึ่งก้อนอิฐดิบในลานดินในร่ม พอดินหมาดแล้วเอาไปตั้งเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ ให้มีช่องโปร่งสำหรับอากาศผ่านได้จนดินแห้งสนิท การผึ่งแบบนี้แห้งช้าอาจจะต้องผึ่งถึง 7 วัน หรือมากกว่านั้น เช่นอาจผึ่งถึง 10 วัน ถ้าเป็นฤดูฝน แต่ดินจะแห้งสม่ำเสมอทั้งภายในและภายนอกก้อน ทำให้ความเสียหายเนื่องจากการผา เช่น การแตก หรือร้าว ของอิฐจะมีน้อยมาก

(2) การผึ่งอิฐโดยวิธีการตากแดด ซึ่งในการผึ่งอิฐโดยตากแดดไว้กลางแจ้งแบบนี้ ผู้ผลิตในระดับอุตสาหกรรมในครัวเรือนนิยมวิธีการผึ่งอิฐวิธีนี้ เพราะผู้ผลิตจะปั้นอิฐในลานดินที่ไม่มีหลังคาคลุม เมื่อถอดแบบแล้วปล่อยให้ตากแดดไว้ประมาณ 3-4 ชั่วโมง ในหน้าอิฐหมาดๆ ใช้ไม้ตบหน้าอิฐให้เรียบ (ขณะที่ปั้นอิฐเมื่อตบแล้วปึกเล็กๆ หรือรอยขรุขระจะหายไปทำให้

หน้าอิฐเรียบเสมอกัน) แล้วปล่อยให้อิฐดิบตากแดดตากลมอยู่บนลาน การผึ่งอิฐแบบนี้อาจจะแห้งเร็ว เนื่องจากได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ เมื่อตากอิฐได้ 1-2 แดด พออิฐแห้งหมาดๆ แล้วจึงนำไปตาก ซึ่งจะตากง่ายไม่แข็งและอ่อนจนเกินไป ในช่วงของการตากอิฐนี้ อิฐจะถูกน้ำไม่ได้เลย เพราะจะทำให้เสียหายได้

กรณีที่ไม่มีแดดจะต้องตากไว้อย่างเช่นกัน หรือกรณีฝนตก ก็ต้องนำไปตากลมไว้ในที่ร่ม ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการโปร่ง เมื่อตากอิฐให้หมาดแล้วต้องตากอิฐเพื่อตกแต่งอิฐให้เรียบอีกทั้ง 5 ด้าน แล้วนำมาตากแดดอีกประมาณ 3-5 วัน ก็อาจจะใช้เผาได้แล้ว ถ้าเป็นฤดูฝน ก็อาจจะใช้เวลามากกว่านี้ การผึ่งอิฐวิธีนี้มีข้อเสียหลายอย่างคือ การได้รับความร้อนที่รุนแรงเกินไป ผิวดินภายนอกจะแห้งแข็งตัวเร็วกว่าภายใน เมื่อเอาไปเผาดินที่ขึ้นอยู่ภายในจะทำให้อิฐแตกร้าวได้มาก และในขณะที่ทำการตากแดด อุณหภูมิของอากาศจะแตกต่างกันมาก ระหว่างเวลากลางวันกับกลางคืน อิฐอาจจะหดตัวไม่สม่ำเสมอ และทำให้ก้อนอิฐบิดเบี้ยว ไม่อยู่ในรูปที่เหมาะสม นอกจากนี้การตากไว้ในที่โล่งจะไม่เป็นการสะดวกในฤดูฝนเมื่อฝนตกลงมา อาจจะต้องหาที่คลุม หรือเก็บเข้าในโรง ถ้าไม่มีสิ่งเหล่านี้ก้อนอิฐดิบเมื่อถูกฝนอาจจะยุบได้

10) การตกแต่งอิฐดิบหรือการตากอิฐ เป็นการตากอิฐให้ผิวหน้าอิฐทุกด้านเรียบเสมอกันไม่มีรอยขรุขระ โดยมากมักตากกันตอนแดดร้อน เช่น ตอนเย็น หรือขนไปตากในที่ร่มก็ได้ การตากอิฐนี้เป็นการเก็บอิฐทอดไว้รอดด้วย หลังจากตากแล้วก็จะไปโปร่งไว้ ณ ที่ซึ่งไม่กีดขวาง การทำงานอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ทำการทอดอิฐใหม่ที่ลานนั้นต่ออีก

การโปร่งอิฐ หลังจากตากอิฐแล้วจำเป็นต้องมีการตากอิฐอีกครั้ง เพราะที่ตาก 2 วัน ก้อนหน้าก้อนอิฐยังไม่แข็งเพียงพอ การตากในช่วงหลังจากนี้ เรียกว่า การโปร่งอิฐ ซึ่งอาจโปร่งไว้ในที่ร่มหรือกลางแจ้งก็ได้ โดยการตั้งซ้อนเรียงสูงขึ้นไป ซึ่งสูงประมาณ 130-140 เซนติเมตร การโปร่งอิฐจะตั้งทับขึ้นไปโดยไม่ประกบหน้าดินซึ่งกันและกัน และจะเอาด้านหน้าตั้งเป็นฐานและจะไม่ตั้งติดกันเพื่อให้โปร่ง ซึ่งจะโปร่งไว้ประมาณ 3 วัน ไม่ว่าจะในที่ร่มหรือกลางแจ้ง

การทับอิฐ เป็นการเก็บเอาอิฐดิบ (อิฐที่ยังไม่เผา) มาตั้งซ้อนไว้เป็นกองใหญ่ มีลักษณะเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่มีลักษณะของการทับคือ ตั้งซ้อนๆ กัน ติดกันทั้งหมด ชั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนของการเตรียมที่จะนำไปตั้งเป็นเตาเผาเพื่อทำให้เป็นอิฐสุก ในช่วงนี้ก็ไม่ควรที่จะให้ถูกน้ำ หรือถูกฝนเช่นกัน

11) การเรียงอิฐดิบในเตาเผา นำอิฐดิบซึ่งผึ่งจนแห้งสนิทและตากแต่งเรียบเรียบร้อยแล้ว ไปวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นในโรงเตาเผา โดยเรียงตั้งเอาส่วนกว้างขึ้น ชั้นล่างเรียงแบบโปร่ง บางแบบต้องเว้นช่องสำหรับใส่ฟืนด้วย (ถ้าเผาด้วยฟืน) ส่วนชั้นบนๆ ขึ้นมาเรียงซ้อนติดกัน แต่

เว้นช่องระหว่างแผ่นไว้เพื่อให้ความร้อนอบได้ทั่วแผ่น การวางเรียงอิฐดิบนี้จะวางกึ่งชั้นและกว้างยาวเท่าใดก็ได้แต่ความต้องการว่าจะเผาอิฐครั้งหนึ่งๆ 10,000-300,000 ก้อน สำหรับเตาเผาที่เผาด้วยแกลบมักจะให้กองอิฐสูงประมาณ 1-1.5 เมตร ทั้งนี้เพราะต้องการให้สะดวกเวลาเติมแกลบเชื้อเพลิง ส่วนเตาที่เผาด้วยไม้ฟืนนั้นบางที่สูงถึง 2 เมตรก็ได้

12) การเผาอิฐ เมื่อตั้งเตาเรียบร้อยแล้วก็จะตั้งกำแพงในลำดับสุดท้าย การก่อกำแพงนี้ ในขั้นแรกจะก่อกำแพงเพียงครึ่งหนึ่งของความสูงของเตาอิฐก่อน จะก่อโดยรอบทั้งสี่ด้าน หรืออาจก่อสูงเท่าเตาเลยก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่ลักษณะของการเผา หรือการจุดไฟเผาอิฐว่าเริ่ม ณ จุดใดก่อน

13) การปล่อยให้อิฐสุกเย็นเมื่ออิฐสุกแล้ว โดยการสังเกตจากกองอิฐที่เผาไม่ยุบลงไปอีกเมื่อเอาไม้เกลี่ย แสดงว่าอิฐที่เผาเต็มเตา ไม่สามารถเทแกลบลงไปเผาให้เกิดความร้อนภายในเตาได้อีก ก็จะหยุดการใส่แกลบ แต่จะปล่อยให้เย็นอย่างนั้นเพื่อให้ไฟภายในดับให้หมดจะใช้เวลาประมาณ 2 วัน ซึ่งถ้าจะเอาอิฐออกจากเตาก็จะต้องเปิดกำแพงทุกด้าน แล้วชักอิฐที่มีลักษณะเหมือนจอบแต่หน้าแคบกว่า เพื่อให้สะดวกต่อการใส่เข้าไปในช่องไฟแล้วดึงเอาอิฐที่เผาออกมา การที่เอาอิฐที่เผาออกนี้เพื่อดับไฟให้หมดโดยสิ้นเชิง และเพื่อความสะดวกในการหาบอิฐด้วย เพราะจะต้องรื้ออิฐออก ถ้าเอาอิฐที่เผาออกก่อนแล้วฝุ่นจะไม่ฟุ้ง และไม่ร้อน

เวลา 2 วัน ที่ปล่อยให้ไฟดับหมดนั้นเป็นช่วงของการบ่มอิฐในเตาจะค่อยๆ เย็นลงเรื่อยๆ ทำให้มวลสารไม่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมากนัก ทำให้อิฐที่ได้มีความแกร่งอย่างสมบูรณ์ ทดสอบได้โดยการฟังเสียงอิฐที่เมื่อเคาะเสียงจะดังก้องเหมือนเคาะเหล็กตัน แต่หากพออิฐสุกแล้วรีบเอากำแพงออกแล้วชักอิฐที่เผาออกทันทีนั้น จะทำให้อิฐไม่ทนและเปราะง่าย

14) การขนออกจากเตา เมื่ออิฐสุกทั่วถึงกันแล้ว ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะไม่ขนอิฐสุก ออกจากเตาไปเก็บไว้ที่อื่นเพื่อรอจำหน่าย แต่จะปล่อยให้อิฐสุกไว้ในเตาต่อไปจนกว่าจะจำหน่ายได้ ดังนั้นเตาเผาอิฐจึงเป็นทั้งเตาเผาอิฐและสถานที่จำหน่ายอิฐ เมื่อมีการจำหน่ายอิฐการขนอิฐออกจากเตาจะใช้วิธีการขนถ่ายด้วยการหาบไปขึ้นยังรถบรรทุกที่ซื้ออิฐที่จอดอยู่หน้าโรงอิฐ การขนถ่ายจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนย้ายด้วย



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิกรรมวิธีในการผลิตอิฐ

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.2 กระบวนการทำปูนปั้น

ศิลปะโบราณวัตถุประเภทปูนปั้นที่พบส่วนใหญ่ มักจะเป็นศิลปะโบราณวัตถุที่ปั้นขึ้นเพื่อเป็น สิ่งประดับตามผนังโบราณสถาน เช่น ผนังโบสถ์ ผนังเจดีย์ เป็นต้น สิ่งที่ปั้นอาจจะเป็นรูปคน รูปสัตว์ ต่างๆ เทวดา นางฟ้า ฯลฯ ซึ่งสะท้อนถึงชีวิตความเป็นอยู่ของคนในสมัยนั้นๆ

2.4.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการปั้นปูน ซึ่งในแต่ละท้องถิ่นจะ แตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปนั้นจะมีวัสดุและอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- (1) ปูนขาว ใช้ปูนชนิดที่ทำจากหินปูน ลักษณะเป็นผง สีขาว
 - (2) ททราย ใช้ทรายชนิดที่ตักจากแม่น้ำ ส่วนทรายชนิดที่นำมาจากหาดทราย ชายทะเลไม่เป็นที่นิยมใช้เป็นวัสดุประกอบการปั้นปูน
 - (3) กาว ใช้กาวชนิดที่ทำจากหนังวัว หรือหนังควายซึ่งแปรรูปมาแล้ว เป็น กาวแผ่นก็ได้
 - (4) เปลือกประดู่ ใช้เปลือกชนิดแห้ง นำมาต้มให้ยางตก เพื่อใช้น้ำยางผสม กับกาวหนัง
 - (5) น้ำตาลโตนดหรือน้ำตาลอ้อย ใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งก็ได้ แปรรูปให้เหลว เพื่อผสมกับ ปูนขาว
 - (6) กระจาดขาง หรือฟางข้าวแห้ง ใช้กระจาดขาง หรือฟางข้าวแห้ง ชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งแปรรูปให้เป็นผงป่นแล้วผสมกับปูนขาว
- อนึ่ง วัสดุที่กำหนดในข้อนี้ มีบางตำราใช้หัวกระจาด ขี้หวกขอย หรือนุ่น อย่างใด อย่างหนึ่งผสมกับปูนขาวแทนการใช้กระจาดขางหรือฟางข้าวก็มี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.2.2 ขั้นตอนของกระบวนการปั้นปูน

โดยทั่วไปมีขั้นตอนกระบวนการปั้นปูน ดังต่อไปนี้

1) การเตรียมปูน

ปูนขาวที่จะใช้สำหรับปั้นต่อไปนั้น ช่างปูนปั้นจะไม่นิยมใช้ปูนขาวใหม่ๆ นำมาตำเลย แต่จะนำปูนขาวใหม่นั้นใส่ลงในโถง ใส่ น้ำสะอาดลงไปให้พอท่วมปูน ปิดฝาโถง และแช่ปูนขาวใหม่นั้นไว้นานๆ อาจเป็นแรมเดือน การแช่ปูนทิ้งไว้นานๆ เช่นนี้ เป็นการทำให้ปูนนั้นมีความเหนียวจัดเมื่อนำไปปั้นแล้วจะจับตัวดี ไม่ร่อน หรือแตกร้าวง่ายในภายหลังเมื่อปูนปั้นนั้นแห้ง ปูนขาวที่ได้ทำการแช่น้ำเตรียมไว้นานๆ นี้ เรียกว่า “ปูนหมัก” เมื่อถึงเวลาจะใช้ก็ตักเอาแต่เนื้อปูนขึ้นมาผึ่งแดดให้พอหมาดแล้วจะนำไปตำต่อไป

องค์ประกอบปูนปั้นที่ใช้ปั้นเป็นรูปภาพ หรือลวดลายต่างๆ มีองค์ประกอบพื้นฐานในการทำปูนสำหรับจะนำไปปั้น ได้แก่ ปูนขาว, กาวหนัง, ทรายละเอียด, กระจก, ฟางแช่น้ำ และน้ำอ้อยหรือน้ำตาลโตนด องค์ประกอบสำหรับทำเป็นปูนปั้นนี้ มีการกำหนดอัตราส่วนผสมเป็นองค์ประกอบ แต่ละสิ่งต่างกันไป เช่น

อัตราส่วนแบบที่ 1 ใช้ :	ปูนขาว	3	ขัน
	ทรายกับกระจก	1	ขัน
	น้ำตาล	1	ชองมือ
อัตราส่วนแบบที่ 2 ใช้ :	ปูนขาว	3	กระป๋องนม
	ทรายกับกระจก	1	กระป๋องนม
	น้ำตาล	1	ทัพพี
อัตราส่วนแบบที่ 3 ใช้ :	ปูนขาว	3	ส่วน
	ทราย	1	ส่วน
	กระจก	5	แผ่น
	น้ำตาล	1	กะลา

ดังตัวอย่างอัตราส่วนดังกล่าวนี้ อัตราส่วนสำหรับวัสดุแต่ละสิ่งที่จะนำมาผสมเข้าด้วยกันนี้ อาจมีอัตราส่วนต่างกันเป็นอย่างอื่นอีกหลายแบบด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสูตรลับเฉพาะตัวของช่างปั้นปูน

2) การตำปูลุ้นปั้น

การตำปูลุ้นปั้นเป็นขั้นตอนต่อไปจากการเตรียมวัสดุต่างๆ ที่จะทำการนำเอาองค์ประกอบของปูลุ้นปั้นมาผสมและทำให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และให้เหนียวจับตัวอยู่ได้พอแก่การที่จะทำการปั้นต่อไป เช่น หากใช้ส่วนผสมดังข้างต้นที่ยกตัวอย่างมา การตำปูลุ้นปั้นในขั้นต้น จะนำปูลุ้นมาผสมกับทรายตามอัตราส่วนดังกล่าวให้เข้ากัน แล้วเอาใส่ลงในครกเติมกระดาษฟางตามส่วน โขลกทำให้เข้ากันสักพักจึงใส่น้ำกาวยผสมรวมลงไป โขลกต่อไปจนส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว และเหนียวจับกันไม่แตก่วน พอถึงตอนนี้ก็เติมน้ำตาลอ้อยหรือน้ำตาลโตนด ซึ่งทำการแปรรูปด้วยการเคี่ยวให้เป็นน้ำยางเหนียวใส่ลงไปในปูลุ้นที่ได้ตำไว้ก่อน แล้วทำการโขลกตำปูลุ้นกับน้ำตาลให้เข้าด้วยกันสนิท จึงตักปูลุ้นขึ้นจากครกพักรอไว้สำหรับนำไปปั้นต่อไป การตำปูลุ้นปั้นนี้

ปูลุ้นซึ่งผ่านการโขลกตำจนเหนียวได้ที่ดีนั้น หมายถึงปูลุ้นที่มีความเหนียวจัดจนติดปลายสากขึ้นมาขณะยกสากขึ้นจากกันครก เมื่อได้ปูลุ้นตำได้ที่เช่นนี้แล้วถ้ายังไม่ถึงเวลาจะนำไปปั้นทำเป็นรูปภาพหรือลวดลาย ช่างปั้นปูลุ้นก็จะนำลงเก็บพักไว้ในโถงปิดฝาให้มิดชิด หรือใส่อ่างดินคลุมปิดด้วยผ้ากระสอบชุมน้ำคลุมให้มิด เพื่อมิให้ปูลุ้นจับตัวแห้งเสียก่อนจะถึงเวลานำไปปั้น

3) ขั้นตอนการปั้นปูลุ้น

การปั้นปูลุ้นทำเป็นรูปภาพ หรือทำเป็นลวดลาย มีขั้นตอนในการปั้นดังนี้

(1) การร่างแบบ

การปั้นปูลุ้นในขั้นต้นต้องร่างแบบ คือเขียนเป็นภาพร่าง เป็นเค้าโครงหยาบๆ ขึ้นบนพื้นที่จะปั้นปูลุ้นนั้นให้เห็นโครงงานทั้งหมดที่จะทำต่อไป การเขียนร่างแบบนี้ช่างปั้นปูลุ้นแต่ก่อนนิยมใช้ถ่านไม้ ซึ่งใช้ต้นพริกนำมาเผาทำเป็นถ่านสำหรับเขียนร่างภาพ โดยใช้ถ่านไม้ชนิดนี้เขียนร่างลงบนพื้นไปจนเต็มโครงงาน ตรวจแก้ตัวภาพ ตัวลาย และช่องไฟ ให้ได้จังหวะเหมาะสมกลมกลืนสวยงามพอดีแล้วจึงลงเส้นหมึกทับเส้นร่าง ซึ่งการลงเส้นหมึกทับเส้นร่างที่เขียนด้วยถ่านไม้ขึ้นก่อนก็เพื่อทำให้ภาพร่างชัดเจน กำหนดเส้นขอบรูปขอบลายให้แน่นอน และยังไม่ทำให้แบบที่วางไว้บนพื้นที่จะปั้นลบลื่นไปในระหว่างทำการปั้น

การลงเส้นหมึกนี้ ช่างปั้นปูลุ้นใช้พู่กันจุ่มหมึกจีนลงทับไปบนเส้นร่างหรือลงแก้เส้นร่างให้เข้ารูปบ้างไปโดยลำดับ แต่การลงเส้นหมึกช่างปั้นปูลุ้นจะไม่พู่กันลงเส้นอย่างเรียบร้อย ประณีตอย่างกับการเขียนลายปิดทองรดน้ำ เขาจะลงเส้นหมึกอย่างที่ช่างเขียน สีนํ้ากาวยโบราณ เรียกว่า “เขียนกระทบเส้น” ทั้งนี้ก็เนื่องจากเส้นหมึกที่ลงไว้บนพื้นนั้น ในเวลาต่อมาก็จะถูกปั้นปูลุ้นทับกลบหมด ไม่เหลือเส้นรอยให้เห็นได้เลยนั่นเอง

(2) การปั้นรูปโคลน

การปั้นปูนลงบนพื้นต่างๆ เช่นพื้นชนิดก่ออิฐถือปูน พื้นกระดาน เป็นต้น ซึ่งเป็นพื้นราบที่มีผิวเรียบยอมเป็นพื้นที่ยื่นจะเกาะหรือจับยึดติดกับพื้นนั้นได้ยาก หรืออาจไม่มั่นคงอยู่ได้นานๆ ดังนั้นในขั้นต้นจึงต้องทำสิ่งช่วยการจับยึดให้กับปูนที่จะปั้นทับลงไปขึ้นเสียก่อน สิ่งที่จะช่วยให้ปูนจับยึดกับพื้นที่ยื่นรับอยู่นั้นอาจทำได้ด้วยการใช้เหล็กสกด หรือลูกขวานสับลงที่พื้นตรงที่จะปั้นปูนนั้นให้เป็นรอยถี่ๆ ทั่วไป ให้เกิดริ้วรอยหยาบพอบเป็นสิ่งที่ให้ปูนเกาะจับอยู่มั่นคงวิธีหนึ่งกับใช้ไม้ไผ่แก่เหลาทำเป็นลูกทอย ตอกลงตรงพื้นที่ที่จะปั้นปูนสลับกันไป โดยให้เหลือปลายลูกทอยโผล่พ้นพื้นที่ที่จะปั้นรูปภาพหรือลวดลายนั้นประมาณ 1 องคุลี ก็จะเป็นสิ่งช่วยให้ปูนจับหรือเกาะพื้นที่ยื่นรับอยู่นั้นได้มั่นคงและถาวรยิ่งขึ้นกว่าวิธีแรก เมื่อจัดทำสิ่งช่วยให้ปูนจับยึดพื้นที่ซึ่งจะปั้นปูนทับลงไปแล้วจึงทำการขึ้นรูปโคลน การขึ้นรูปโคลน คือการใส่ปูนแปะลงไปตามแนวเส้นร่างที่ได้ทำขึ้นเป็นเค้าโครงไว้ โดยใช้เกรียงตัดปูนแปะและให้ติดเป็นปื้นบางๆ ให้ทั่วพื้นที่เป็นรูปภาพ หรือลวดลาย ทำให้พื้นที่บริเวณนั้นเกิดเป็นผิวขรุขระขึ้น แล้วพักไว้ให้ปูนที่ขึ้นโคลนไว้คร่าวแรกนี้หมาดและจับติดพื้นดีพอแล้วจึงขึ้นรูปโคลน ขึ้นต่อไป

การขึ้นรูปโคลนต่อมา คือการพอกปูนทับลงบนผิวปูนที่โคลนขึ้นเมื่อคร่าวแรกให้หนาขึ้น และปั้นทำเป็นรูปทรงหยาบๆ พอให้เค้าโครงที่จะปั้นทำส่วนละเอียดเพิ่มเติม ในขั้นต่อไป

(3) การปั้นรัดรูป – รัดลาย

การปั้นปูนขั้นนี้ คือการพอกปูน และปั้นทำรูปภาพ หรือลวดลายให้สมบูรณ์ตามรูปลักษณะ ให้สำเร็จเป็นรูปสมบูรณ์ เรียบร้อย และสวยงาม ขั้นตอนนี้ช่างปั้นปูนจะต้องใช้ความสามารถในฝีมือ ความคิด ความรู้สึกในการแสดงออก จินตนาการ และประสบการณ์ ในการทำงานศิลปกรรมประเภทนี้ ถ่ายทอดออกมาในการปั้นปูนอย่างเต็มความสามารถ จึงจะแสดงการรัดรูป หรือรัดลาย ให้ดูสมจริงสมจัง และมีคุณค่าควรแก่การดูชม

4) การตกแต่งงานปั้นปูน

งานปั้นปูนที่สำเร็จแล้วปรกติจะมีผิวเป็นสีขาว ซึ่งเป็นสีเดิมอันเป็นธรรมชาติของปูนขาวที่นำมาใช้ปั้นงานปั้นปูนที่มีผิวเป็นสีขาวสะอาดเช่นนี้ ขึ้นอยู่กับความนิยมของในหมู่ช่างปั้นปูนและคนทั่วไป ซึ่งความนิยมการตกแต่งงานปั้นปูนที่ได้ทำให้มีลักษณะต่างไปจากความนิยมงานปั้นปูนดังกล่าวข้างต้นก็มีอยู่ในงานปั้นปูนหลายอย่างหลายวิธีด้วยกัน ดังนี้ การตกแต่งด้วยการ

ลงรักปิดทอง, การลงรักปิดทองร่องกระจก, การถมพื้นเป็นสี, การระบายสีบนงานปูนปั้น และการทำปูนปั้นให้เป็นสี

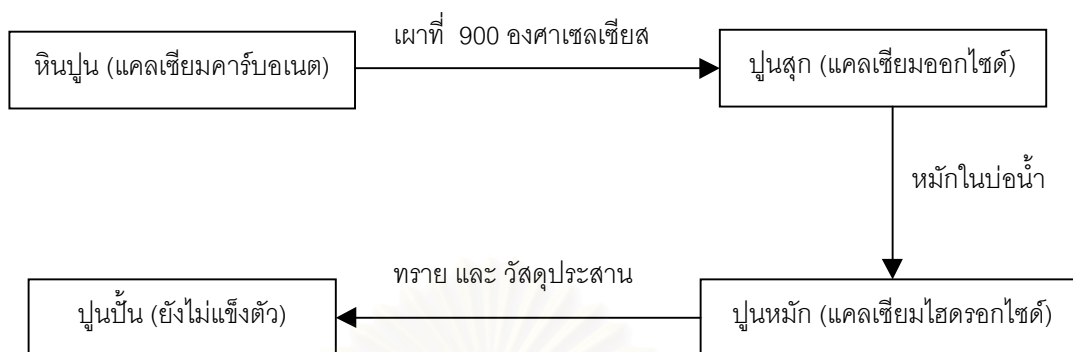
งานปูนปั้นเป็นศิลปกรรมที่มีคุณค่าในตัวเอง เนื่องจากงานปูนปั้นเป็นศิลปกรรมประเภทประติมากรรมที่ได้รับการสร้างสรรค์ขึ้นโดยช่างปั้นปูน อันปรากฏให้เห็นมาแต่โบราณ บวกกับมีการสืบต่อมาในภายหลังโดยลำดับจนกระทั่งถึงปัจจุบัน จัดว่างานปูนปั้นนี้เป็นศิลปกรรมประจำชาติ และมีคุณค่าที่สำคัญยิ่ง

2.4.2.3 คุณสมบัติ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

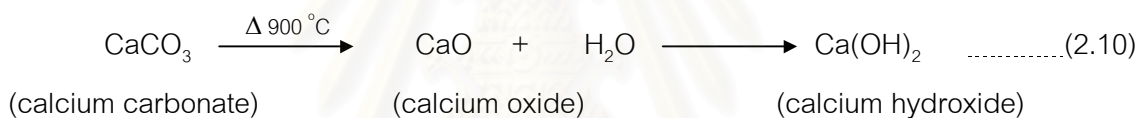
ศิลปะโบราณวัตถุประเภทปูนปั้นนั้น ในส่วนของปูนขาวที่ใช้ได้จากการนำหินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ที่มีคุณภาพดี เนื้อหินบริสุทธิ์ไม่มีธาตุหรือสารอื่นแทรกปนอยู่ เนื่องจากถ้าหินปูนไม่บริสุทธิ์อาจจะมีส่วนผสมของหินชนิดอื่นปน ทำให้ศิลปะโบราณวัตถุประเภทปูนปั้นที่ผลิตขึ้นจะมีสีแตกต่างออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนนั้น เช่น ถ้าหากสิ่งที่มาเจือปนนั้นเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate) ศิลปะโบราณวัตถุประเภทปูนปั้นที่ผลิตขึ้นมาจะมีสีออกนวลๆ สีไม่ขาวบริสุทธิ์ หลังจากนั้นเมื่อนำหินปูนมาเผาโดยให้ความร้อน 900 องศาเซลเซียส จะทำให้หินปูนสลายตัวเป็นปูนสุก หรือแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) ลักษณะเป็นก้อนๆ สีขาว แล้วนำปูนสุกนั้นไปแช่ในบ่อคนจนปูนเย็น แล้วจึงตักกรองลงไปใบบ่อหนึ่ง การกรองจะแยกเอากากและสิ่งเจือปนซึ่งละลายอยู่ในชั้นน้ำออกเพื่อให้ได้เนื้อปูนละเอียด แต่สิ่งเจือปนที่อยู่ในเนื้อปูนปั้นนั้นขจัดออกได้ยาก (อิติมา, 2539)

หลังจากนั้นช่างปั้นปูนจึงจะนำไปทำตามกระบวนการดังที่กล่าวมาแล้ว กล่าวคือหมักปูนขาวไว้ในโอ่ง หรือบ่อปูน โดยใส่ปูนขาวครึ่งหนึ่งเติมน้ำลงไปครึ่งหนึ่งเช่นกัน หรือเติมน้ำให้พอท่วมปูนขาว หมั่นกวนและถ่ายน้ำทิ้งหลายๆ ครั้ง แล้วจึงนำไปใช้ ปกติมักจะหมักไว้ประมาณ 3 เดือน หรือนานกว่านั้น ปูนที่ได้เรียกว่า ปูนหมัก หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) และการทำงานก็มักนำปูนหมักนี้ไปผสมกับวัสดุต่างๆ ตามสูตรของแต่ละที่ ซึ่งโดยหลักๆ คือผสมกับทราย และวัสดุประสาน ซึ่งอาจจะเป็นน้ำอ้อย ข้าวเหนียว ไข่ขาว กาวหนังสัตว์ หรือยางจากต้นไม้ เป็นต้น

กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เราสามารถสรุปกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ในรูปที่ 2.4 และปฏิกิริยา (2.10) ได้ดังนี้

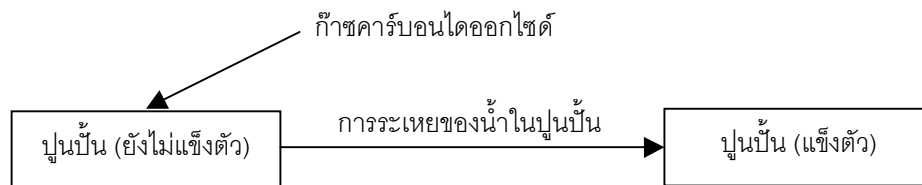


รูปที่ 2.4 แผนผังกระบวนการเปลี่ยนแปลงของปูนป่น

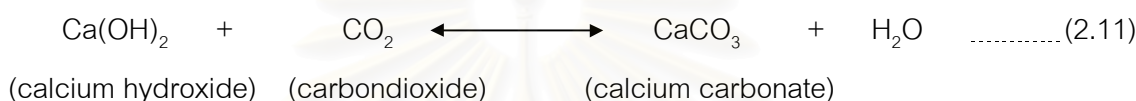


ในขณะที่นำปูนหมักมาใช้ขึ้น ขั้นตอนนี้ปูนหมักจะเปลี่ยนไปเป็นหินปูนซึ่งจะเกิดการหดตัว ทำให้ปูนป่นบิดเบี้ยว เสียรูปทรงได้ จึงเติมทรายเข้าไปเพื่อทำให้ปูนป่นหดตัวน้อยลง แต่หากเติมทรายมากเกินไปก็จะทำให้เนื้อของปูนป่นนั้นหยาบ ส่วนสาเหตุของการเติมวัสดุประสานเนื่องจากในตอนแรกๆ ของการป่นนั้น ปูนหมักไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้ ดังนั้นจึงต้องเติมวัสดุประสานเพื่อให้ปูนหมักนั้นป่นเป็นรูปร่างตามต้องการได้

เมื่อนำมาป่นเป็นรูปตามที่ต้องการแล้ว ในขณะที่ปูนป่นจะยังเปียกและอ่อนตัวอยู่ จะต้องทิ้งปูนป่นนั้นไว้ให้แห้งแล้วปูนป่นจะแข็งตัวกลายเป็นหินปูนตามสภาพเดิม ขบวนการแข็งตัวของปูนป่น เป็นขบวนการแลกเปลี่ยนของน้ำกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide) กล่าวคือน้ำในปูนป่นจะเกิดการระเหยให้แก่บรรยากาศรอบๆ และในขณะเดียวกันก็จะเกิดการดูดซึมน้ำจากคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศเข้าสู่วัตถุ



รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการแข็งตัวของปูนปั้น



ปูนปั้นบางส่วนมีเนื้อยุ่ย สึกกร่อน มีรอยร้าว รอยแตก มีผลึกเกลือ มีคราบเปื้อน มีตะไคร่ สาเหตุของการเสื่อมสภาพอาจเกิดจากกรรมวิธีในการผลิต เช่น ทรายที่นำมาผสมอาจจะมี สารเจือปน หรือเกลือปะปนมา ซึ่งเมื่อล้างไม่สะอาดพอก็จะมีเกลือตกค้างอยู่ ดังนั้นเกลือจึงยังคง ปะปนอยู่ในเนื้อปูน เมื่อปั้นเป็นรูปแล้วทิ้งไว้ให้แห้งน้ำจะระเหยออกมาและพาเอาเกลือออกมาที่ผิวของ วัตถุ ทำให้เห็นเป็นคราบผงสีขาวที่ผิวของปูนปั้น แต่ถ้าเกลือนั้นยังอยู่ข้างในเนื้อวัตถุ เมื่อน้ำระเหยออก เกลือจะเกิดการตกผลึกและมีปริมาณใหญ่ขึ้นทำให้เกิดรอยร้าวเล็กๆ ขึ้นหลังจากที่ปูนแข็งตัวแล้ว หลังจากนั้นถ้าความชื้นรอบๆ วัตถุสูงขึ้น วัตถุจะดูดความชื้นเข้ามา (เพื่อปรับระดับความชื้นสัมพัทธ์ ให้เข้าสู่สภาวะสมดุล) แล้วพาเกลือนั้นเข้าสู่ภายในเนื้อวัตถุ เกลือบางชนิดเมื่อรับความชื้นแล้วจะเกิด การขยายตัวแล้วเกิดแรงดันออกไปโดยรอบ ทำให้เกิดรอยร้าวเล็กๆ เมื่อเป็นเช่นนี้เรื่อยๆ ทำให้เนื้อวัตถุ ยุ่ยและชำรุดได้

ในกรรมวิธีการผลิตนั้นก็มีส่วน มีการเติมวัสดุประสานซึ่งมักจะเป็นอินทรีย์วัตถุซึ่งจะ สามารถเสื่อมสภาพได้โดยแสงสว่าง ความชื้น ความร้อน และมลพิษทางอากาศ เนื่องจากอากาศมัก จะมีก๊าซซึ่งเมื่อรวมตัวกับน้ำกลายเป็นกรดอ่อนๆ เมื่อวัสดุประสานละลายออกไปเรื่อยๆ หรือเมื่อ อินทรีย์วัตถุที่ใช้ เป็นวัสดุประสานเสื่อมสภาพไปก่อนที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศจะถูกดูดซึม เข้าสู่วัตถุ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทรกซึมเข้าไปน้อยเกินไป จะทำให้เนื้อปูนปั้นมีแรงยึดเหนี่ยว ลดลงอาจจะทำให้เสียรูปทรง และไม่สามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารที่มีความแข็ง ได้ เนื้อของวัตถุจึงยุ่ย นอกจากนี้ก๊าซบางชนิดในบรรยากาศสามารถเปลี่ยนเนื้อปูนปั้น หรือแคลเซียม

คาร์บอนेट ให้เป็นเกลือซึ่งมีปริมาตรที่ใหญ่ขึ้นและมีความแข็งมากกว่าเนื้อปูนเดิม เกลือบางชนิดสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดีจึงทำให้เชื้อราและตะไคร่เจริญได้ดีที่ผิววัตถุ

สาเหตุอีกประการที่ทำให้ปูนปั้นแตกร้าว เกิดจากการที่ปูนและทรายมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวไม่เท่ากัน ดังนั้นในเวลากลางวันซึ่งอากาศจะร้อนกว่าในตอนเช้าและตอนเย็นหรือวัตถุได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากสาเหตุใดก็ตาม ปูนและทรายจะขยายตัวด้วยอัตราไม่เท่ากัน เมื่อวัตถุมีการขยายตัวจะเกิดการผลัดกัน แต่เนื่องจากทรายมีค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อปูน จึงทำให้ความแข็งแรงของเนื้อปูนลดลงและเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นทุกวัน จึงทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้

สภาพของอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทย ทำให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ทั่วไปหลายสายพันธุ์ในอากาศเจริญได้อย่างรวดเร็วมาก บางครั้งความชื้นในเนื้อปูนเกิดจากน้ำใต้ดินที่ขึ้นมาจากผนังที่ปูนปั้นนั้นระดับอยู่ น้ำจึงระเหยออกทางปูนปั้น จึงทำให้ปูนปั้นนั้นมีความชื้นสูงมาก หรือเกิดจากการที่ปูนปั้นถูกน้ำฝนน้ำค้างเนื่องจากอยู่นอกอาคาร ส่วนปูนปั้นที่อยู่ในห้องจัดแสดงเมื่อมีฝุ่นมาสะสมบนวัตถุ ซึ่งฝุ่นสามารถดูดความชื้นได้ดีทำให้บริเวณที่มีฝุ่นเกาะมีความชื้นสูงซึ่งเหมาะแก่การเจริญของจุลินทรีย์ สาเหตุทั้งหมดนี้จึงทำให้เกิดคราบสีต่างๆ เช่น ดำ น้ำตาล เหลือง และเขียว ขึ้นได้

นอกจากนี้ ศิลปะโบราณวัตถุประเภทปูนปั้นที่อยู่นอกอาคารจะถูกแรงปะทะของลมฝน ทุกวัน ทุกเวลา ลมจะพาเอาฝุ่น เศษดิน เศษทราย มาด้วย เมื่อปะทะกับวัตถุทุกวันจึงทำให้เนื้อปูนปั้นเกิดการสึกกร่อนได้

2.5 การกัดกร่อนและการอนุรักษ์โบราณสถานและโบราณวัตถุ

ในศิลปะโบราณวัตถุจะประกอบไปด้วยวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างกัน และมีกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกันออกไป ในทางวิทยาศาสตร์สามารถแบ่งวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของศิลปะโบราณวัตถุออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ อินทรีย์วัตถุ และอนินทรีย์วัตถุ (จิราภรณ์, 2539)

1) อินทรีย์วัตถุ หมายถึงวัสดุที่ได้มาจากสิ่งที่มีชีวิต หรือเป็นผลผลิตที่ได้มาจากสิ่งที่มีชีวิต ดังนั้นองค์ประกอบหลักของศิลปะโบราณวัตถุประเภทนี้ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน นอกจากนี้อินทรีย์วัตถุยังแบ่งออกเป็น

(1) อินทรีย์วัตถุที่ได้จากพืช ได้แก่ ฝ้าย ผ้าลินิน ฝ้ายป่าน ฝ้ายปอ ไม้ กระดาษ ใบลาน เครื่องจักสาน เครื่องเงิน ยางไม้ สีย้อม ฯลฯ วัตถุประเภทนี้จะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ

(2) อินทรีย์วัตถุที่ได้จากสัตว์ ได้แก่ ไข่ไหม ฝ้ายขนสัตว์ หนังสัตว์ กระดุก งา เขา ผม ขน ฯลฯ วัตถุประเภทนี้จะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ

(3) อินทรีย์วัตถุที่ได้จากการสังเคราะห์ ได้แก่ พลาสติกชนิดต่างๆ ยางสังเคราะห์ ฟิล์มถ่ายรูป ฟิล์มภาพยนตร์ แผ่นเสียง ฝ้ายสังเคราะห์ ฯลฯ

2) อนินทรีย์วัตถุ หมายถึงวัตถุที่ทำมาจากสิ่งที่ไม่มีชีวิต ได้แก่ หิน ดิน แร่ต่างๆ โลหะ ฯลฯ ตัวอย่างเช่น เหล็กที่ได้มาจากการถลุงแร่เหล็ก เครื่องปั้นดินเผาที่ทำมาจากดินเหนียว แก้วทำจากทราย ปูนปั้นทำจากปูนขาว เป็นต้น ซึ่งอนินทรีย์วัตถุยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

(1) โลหะ (metal) ที่สำคัญได้แก่ ทองคำ เงิน ทองคำขาว เหล็ก ตะกั่ว ทองแดง ดีบุก สังกะสี ฯลฯ และโลหะผสมต่างๆ เช่น สัมริด (โลหะผสมของทองแดงกับดีบุก) ทองเหลือง (โลหะผสมของทองแดงกับสังกะสี) ชิน (โลหะผสมของตะกั่วกับดีบุก) เป็นต้น

(2) อโลหะ (non- metal) ที่สำคัญได้แก่ หิน อิฐ เครื่องปั้นดินเผา ปูนปั้น เครื่องเคลือบ และแก้ว เป็นต้น

ดังนั้นเมื่อวัสดุเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยา ในอัตราที่ต่างกัน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุชำรุดทรุดโทรมเสื่อมสภาพ

2.5.1 สาเหตุของการกัดกร่อน

สาเหตุที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการชำรุดทรุดโทรมเสื่อมสภาพ สามารถแบ่งได้เป็นหลายสาเหตุและหลายกระบวนการ ซึ่งจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน และมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน จนบางครั้งไม่สามารถแยกออกจากกันได้โดยเด็ดขาด ทั้งนี้อาจมาจากสิ่งแวดล้อม จุดอ่อนในตัววัตถุเอง หรือจากการกระทำของมนุษย์และสัตว์ (ภักดี ทรงเจริญ, 2542) ซึ่งสาเหตุจากสิ่งแวดล้อมนั้นมีบทบาทสำคัญมากที่สุดต่อการชำรุดเสื่อมสภาพของโบราณสถานและโบราณวัตถุ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ หรือป้องกันได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งโบราณสถานและโบราณวัตถุที่อยู่กลางแจ้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ความชื้น ความร้อน แสงสว่าง ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ ฝุ่นละออง เกลือ พืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ล้วนมีบทบาทสำคัญที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสาเหตุจากการกระทำของมนุษย์และสัตว์นั้น ศิลปโบราณวัตถุที่ถูกทำลายมักชำรุดเสื่อมสภาพอย่างถาวร

หากพิจารณากระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพของโบราณสถานและโบราณวัตถุ โดยอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์นั้น จะสามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพนี้ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเชิงกล ทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีววิทยาของศิลปโบราณวัตถุ โดยมีสาเหตุต่างๆ มากมาย เพื่อความสะดวกในการดูแลรักษาโบราณสถานและโบราณวัตถุ จะแบ่งสาเหตุที่ทำให้

ศิลปโบราณวัตถุ เหล่านี้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ สาเหตุภายใน และ สาเหตุภายนอก (จิราภรณ์, 2539)

1) สาเหตุภายใน

เป็นสาเหตุจากจุดอ่อนในตัววัตถุเองมาจากการที่วัสดุต่างๆ ของโบราณสถาน และ โบราณวัตถุมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ความสามารถในการดูดและคายความชื้นแตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และ โครงสร้างของวัตถุแต่ละชนิดด้วย ซึ่งในเรื่องของกระดาษ หรือสิ่งพิมพ์ โบราณนั้นจะมีสารประเภทชั้นสน สารส้ม และเนื้อไม้บางชนิดที่นำมาเย็บทำกระดาษ จะมีสารลิกนิน เมื่อนานเข้าก็จะเปลี่ยนสภาพเป็นกรด หรือน้ำหมึกที่ใช้เขียนก็จะมีส่วนประกอบของ เหล็กกรรมอยู่ด้วย มีผลต่อการกัดกร่อนและทำลายด้วยเช่นกัน แม้แต่หินก็มีจุดอ่อนภายในตัวเอง หินบางชนิดมีแนวโน้มที่จะแตกออกเป็นชั้นๆ โดยง่าย หินแกะสลักอาจมีรอยร้าว รอยแตก แล้วเกิดการกะเทาะ แตก ร้าว บิ่น และหลุดร่วงออกมาเมื่อมีแรงมากระทบเพียงเล็กน้อย

ศิลปโบราณเหล่านี้อาจเริ่มชำรุดเสื่อมสภาพตั้งแต่อยู่ในระหว่างขั้นตอนการผลิต หรือ ในระหว่างการใช้งาน อัตราการชำรุดเสื่อมสภาพจะสูงขึ้นมากเมื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม หรือเก็บรักษา และจัดแสดงด้วยวิธีที่ไม่เหมาะสม

2) สาเหตุภายนอก

กระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพของศิลปโบราณวัตถุที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากการกระทำของสิ่งแวดล้อม ได้แก่ มนุษย์ อุณหภูมิ ความชื้น แสงสว่าง ลม ฝน ฝุ่นละออง ก๊าซ นก หนู ฯลฯ สาเหตุเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในกระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพของศิลปโบราณวัตถุ

(1) มนุษย์

สาเหตุจากการกระทำของมนุษย์นั้น ศิลปโบราณวัตถุที่ถูกทำลายมักชำรุดเสื่อมสภาพอย่างถาวร เช่น มนุษย์มักทำลายโดยการตัดหรือทำลายศิลปโบราณวัตถุ เพื่อเคลื่อนย้าย นำออกไปจากแหล่งเดิม

(2) อุณหภูมิ

อุณหภูมิยังมีผลต่อการเสื่อมสภาพในลักษณะอื่นๆ อีก เช่น อุณหภูมิสูงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เกิดขึ้นได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีความชื้นเข้าร่วมด้วย ปฏิกิริยาจะยิ่งทวีความรุนแรง แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ทำอันตรายต่ออินทรีย์วัตถุแทบทุกชนิด พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้จะทำให้โมเลกุลของอินทรีย์วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีขั้นตอนที่สลับซับซ้อน ผลสุดท้ายจะทำให้โมเลกุลแตกหัก อินทรีย์วัตถุมักมี

สภาพกรอบเปราะ ขาดความเหนียว ขาดความยืดหยุ่น มีสีซีดจาง การเสื่อมสภาพในลักษณะเช่นนี้
ค่อนข้างรุนแรงและยากต่อการอนุรักษ์

(3) ความชื้นและน้ำ

น้ำฝนและความชื้น มีบทบาทสำคัญและก่อให้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพได้
รุนแรงที่สุด โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับวัตถุโดยตรง หรือช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อม
อื่นๆ เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น โดยอาจไปละลายองค์ประกอบบางส่วนของโบราณสถาน และโบราณวัตถุ หรือ
อาจรวมกับดิน ฝุ่นละออง ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ รวมทั้งวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของโบราณสถาน
และโบราณวัตถุเอง แล้วกลายเป็นสารละลายกรด ต่าง หรือ เกลือ ซึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับโบราณสถาน
และโบราณวัตถุ แล้วก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากมาย ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดที่สุดคือ การเป็นสนิม
และการสึกกร่อน ของโลหะชนิดต่างๆ การสึกกร่อนของหิน อีฐ ปูน ฯลฯ

(4) แสงสว่าง

เป็นสาเหตุให้ศิลปโบราณวัตถุที่ทำจากอินทรีย์วัตถุชำรุดเสื่อมสภาพ วัตถุที่
ได้รับแสงเป็นเวลานานๆ จะสีซีดจาง หรือมีสีเปลี่ยนไปจากเดิม เนื้อวัตถุมักกรอบ เปราะ ขาดความ
เหนียว ขาดความยืดหยุ่น ขาดความแข็งแรง ฉีกขาดง่าย ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ ภาพเขียน และ
ผ้าโบราณ ส่วนที่ได้รับแสงสว่างมักมีสีซีดจางลง หรือมีสีเปลี่ยนไปจากเดิม เส้นใยเปื่อยกรอบฉีกขาด
การชำรุดเสื่อมสภาพเช่นนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างถาวร ไม่สามารถซ่อมแซมหรือแก้ไขให้
กลับสู่สภาพเดิมได้

(5) แมลง

แมลง เป็นสาเหตุให้ศิลปโบราณวัตถุที่ทำจากอินทรีย์วัตถุชำรุดเสื่อมสภาพ
ไปอย่างน่าเสียดาย เนื่องจากแมลงส่วนใหญ่ใช้ปากกัดกินทำลายศิลปโบราณวัตถุ ทำให้เกิดการชำรุด
เสื่อมสภาพอย่างถาวร แมลงที่พบมาก เช่น ปลวก, แมลงสาบ, ไร, แมลงสามง่าม และ มอด เป็นต้น

(6) จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ ที่มีบทบาทสำคัญเป็นสาเหตุให้ศิลปโบราณวัตถุชำรุดเสื่อมสภาพ
ได้แก่ รา, สาหร่าย, แบคทีเรีย สำหรับศิลปโบราณวัตถุที่เก็บรักษาในที่ร่มนั้นมักพบราขึ้นเจริญเสมอ
ในช่วงที่มีความชื้นสูง ระหว่างเดือนสิงหาคม - ตุลาคม ของทุกปี ส่วนสาหร่ายและแบคทีเรีย จะพบ
กรณีที่ศิลปโบราณวัตถุอยู่กลางแจ้งหรืออยู่ในที่น้ำท่วมถึงหรือมีฝนสาดหรือเปียกชื้นอยู่เสมอ

(7) สัตว์อื่นๆ

ได้แก่ นก, หนู และค้างคาว ต่างมีบทบาทในการทำลายศิลปโบราณวัตถุ
ทั้งโดยทางตรงและโดยทางอ้อม หากเป็นหนูเนื้อของศิลปโบราณวัตถุจะถูกกัดกินเป็นอาหาร เกิดเป็น

ช่องโหว่ หรือรูพรุน ส่วนนกและค้างคาว มูลทำให้ศิลปะโบราณวัตถุสกปรกเปรอะเปื้อน สีกร่อนและ มีกลิ่นเหม็น

(8) ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ

ก๊าซหลายชนิดในบรรยากาศ มีบทบาทต่อการชำรุดเสื่อมสภาพของวัตถุหลายชนิด เช่น ก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ทำให้โลหะเป็นสนิม ก๊าซโอโซน เป็นตัวเติมออกซิเจนที่รุนแรงสามารถทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลของอินทรีย์วัตถุหลายชนิดแตกหักออก โดยการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด คือ ทำให้ผ้า, กระดาษ และภาพเขียน อ่อนนุ่ม ฉีกขาดง่าย และมีสีซีดจาง ในบริเวณที่มีโรงงานอุตสาหกรรม หรือมีการจราจรที่คับคั่ง จะพบได้ว่าในบรรยากาศบริเวณนั้นจะมี ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ปะปนอยู่ด้วยปริมาณสูงกว่าปกติ ก๊าซเหล่านี้จะรวมตัวกับน้ำหรือไอน้ำแล้วได้กรด ซึ่งจะสามารถกัดกร่อนเนื้อวัตถุทุกชนิด ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับโลหะ และเกลือของโลหะหลายชนิดทำให้โลหะหมองคล้ำเป็นสนิม เกลือของโลหะบางชนิดใช้เป็นรงควัตถุ (วัตถุให้สี) เมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะเปลี่ยนสี เช่น สีขาวมาจากตะกั่วคาร์บอเนตมักเปลี่ยนเป็นสีดำ เป็นต้น

(9) ฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองและอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ ก็ก่อให้เกิดความเสื่อมสภาพได้หลายรูปแบบ ในพื้นที่ที่มีลมแรงฝุ่นละอองที่ปลิวมากับลมอาจแข็งพอที่จะขัดสีผิวของวัตถุให้สีกร่อนลงไปเรื่อยๆ ในบริเวณที่ลมสงบฝุ่นละอองจะสะสมพอกพูนอยู่บนวัตถุ ทำให้เกิดคราบสกปรก ในบริเวณที่มีความชื้นสูงหรือเปียกชื้นฝุ่นละอองเหล่านี้จะรวมตัวกับน้ำ หรือไอน้ำ และจะกลายเป็นสารละลายของกรด ด่าง หรือเกลือ ซึ่งทำปฏิกิริยาเคมีกับวัตถุได้หลายรูปแบบ ฝุ่นละอองบางประเภท เช่น เขม่าและควัน ซึ่งมีลักษณะเป็นวัตถุเหนียวๆ ติดอยู่บนผิวของวัตถุ ทำให้แลดูสกปรก ทำความสะอาดยาก และยังเป็นแหล่งสะสมฝุ่นละอองประเภทอื่นๆ รวมทั้งสปอร์ต่างๆ ให้มาเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของวัตถุมากขึ้นเรื่อยๆ ฝุ่นละอองบางประเภทดูดความชื้นได้ดี จึงทำให้ผิวของวัตถุชื้นขึ้น และทำให้น้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับวัตถุได้มากขึ้น

(10) เกลือ

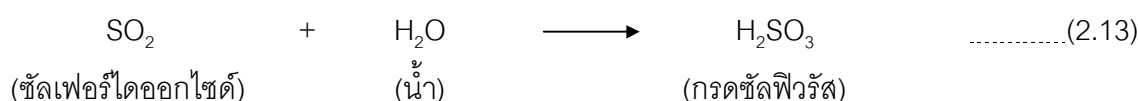
ในสิ่งแวดล้อมมีเกลือปะปนอยู่มากมายหลายชนิด เช่น ในพื้นที่ที่อยู่ใกล้กับทะเลจะมีเกลือแกงปะปนอยู่ในบรรยากาศมาก ทำนองเดียวกันในพื้นที่ที่ตั้งอยู่บนแหล่งเกลือสินเธาว์ ก็จะมีเกลือแกงปะปนอยู่ในดิน ในน้ำใต้ดิน และแหล่งน้ำต่างๆ มากมาย เกลือเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับโบราณสถานและโบราณวัตถุได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็วยิ่งขึ้นหากมีความชื้นร่วมด้วย เกลือส่วนใหญ่สามารถละลายน้ำได้ดี แล้วกลายเป็นสารละลายของเกลือซึ่ง

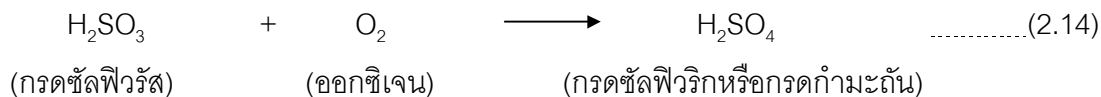
สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุที่มีรูพรุน เช่น หิน เครื่องเคลือบ เครื่องปั้นดินเผา อิฐ ปูนปั้น ฯลฯ แล้วสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัตถุ เมื่อใดที่มีความชื้นลดลงน้ำจะระเหยออกไปตรงผิวของวัตถุ ส่วนเกลือจะตกผลึกอยู่ในเนื้อวัสดุนั้นๆ การตกผลึกจะเกิดมากตรงผิวของวัสดุที่มีอัตราการระเหยสูง เมื่อใดที่มีความชื้นสูงขึ้นเกลือจะดูดความชื้นแล้วกลายเป็นสารละลายอีก และตกผลึกเมื่อความชื้นลดลงหรือเมื่อน้ำระเหยออกไป จะเป็นเช่นนี้ซ้ำแล้วซ้ำเล่าตลอดเวลา ผลึกเกลือจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนในที่สุดจะขยายขนาดคั่นให้ช่องว่างและรูพรุนภายในเนื้อวัสดุแตกออก โบราณสถานและโบราณวัตถุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือจะเห็นเป็นขุยเกลือตกผลึกอยู่บนผิวของวัสดุตรงส่วนที่มีการระเหยของน้ำมากๆ บางครั้งพบผลึกเกลืออยู่ในเนื้อวัสดุ จากนั้นผิวของวัสดุจะเปื่อยยุ่ยหลุดร่วงออกมาเป็นผงๆ ปรากฏการณ์นี้เห็นได้ชัดบนผนังโบราณสถานซึ่งมีความชื้นจากใต้ดินนำเกลือขึ้นมาตกผลึกบนผิวของผนังส่วนที่มีความชื้นระเหยออกได้ดี และบนโบราณวัตถุที่ได้จากใต้ดินหรือใต้ทะเล ซึ่งเกลือจากใต้ดินหรือจากน้ำทะเลเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อวัสดุเป็นเวลานาน หากนำขึ้นมาวางทิ้งให้แห้งจะพบผลึกเกลืออยู่บนผิวของวัสดุด้วยเสมอ

2.5.2 การกัดกร่อน และปฏิกิริยาการกัดกร่อน

จากการตรวจสอบด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์ พบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ข้างต้นนั้นเกิดจากเกลือและความชื้น เกลือที่สร้างปัญหามากคือเกลือที่ละลายน้ำได้ (soluble salts) เกลือเหล่านี้ไวต่อปฏิกิริยาหรือพร้อมที่จะทำปฏิกิริยาอยู่ตลอดเวลา หากมีน้ำหรือความชื้นร่วมอยู่ด้วยปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น

ก๊าซหลายชนิด เมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือไอน้ำในอากาศ จะกลายเป็นกรด ซึ่งเมื่อกรดทำปฏิกิริยากับวัสดุก่อสร้างก็จะกลายเป็นเกลือ โดยก๊าซที่สำคัญได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือไอน้ำ จะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H₂CO₃) และกรดกำมะถัน (H₂SO₄) ตามลำดับ ดังสมการ





เมื่อกรดเหล่านี้ ทำปฏิกิริยากับวัสดุก่อสร้างที่มีสารประกอบคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น



การเปลี่ยนแปลงดังตัวอย่างข้างบน มีบทบาทสำคัญมากในการเสื่อมสภาพของวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่มีความเจริญทางอุตสาหกรรม “ฝนกรด” ทำให้วัสดุก่อสร้างสึกกร่อน ผุพังและมีคราบสกปรกน่าเกลียด สร้างปัญหาให้แก่อนุรักษ์อย่างหนัก สำหรับในประเทศไทย ปริมาณ “ฝนกรด” ยังไม่สูงมากนัก จึงยังไม่เป็นปัญหาสำคัญ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาตราบใดที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปะปนอยู่ในอากาศ แม้ในบรรยากาศที่บริสุทธิ์ก็มีก๊าซเหล่านี้อยู่แต่มีเพียงเล็กน้อย ปฏิกิริยาจึงเกิดอย่างช้าๆ ทีละน้อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปนานเข้าวัสดุก่อสร้างจะสึกกร่อนและปริมาณเกลือจะสูงขึ้นเรื่อยๆ

กระบวนการเสื่อมสภาพที่มีเกลือเป็นต้นเหตุ อาจเป็นการเปลี่ยนแปลง ทางกายภาพ หรือ ทางเคมี หรืออาจทั้งสองอย่างผสมผสานกัน ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทำให้วัสดุก่อสร้างสึกกร่อน ขาดความแข็งแรง แตกหัก หรือหลุดร่อนออกเป็นผง เพราะขาดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุก่อสร้างนั้นๆ วัสดุประสานอาจทำให้ปฏิกิริยาเคมีกับเกลือแล้วละลายหายไป ทำให้วัสดุก่อสร้างโปร่งพรุนและอ่อนนุ่ม เกลือบางชนิดทำให้เกิดคราบเปื้อนต่างๆ แต่การเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อการผุเปื่อยของวัสดุก่อสร้างมากอย่างเห็นได้ชัด คือการที่เกลือแทรกซึมเข้าไปสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ หรือรูพรุนของเนื้อวัสดุ โดยมีน้ำเป็นตัวนำพา น้ำที่มีอยู่ในวัสดุก่อสร้างจะระเหยตรงผิวนอกสุดของวัสดุ เพราะเป็นส่วนที่ร้อนที่สุดและได้รับอิทธิพลจากลมช่วยทำให้น้ำระเหยออกไป เมื่อน้ำที่ผิวนอกสุดระเหยออกไป น้ำจากส่วนที่อยู่ถัดเข้าไปข้างในก็จะเคลื่อนตัวมาแทนที่น้ำดังกล่าวจะพาเกลือที่ละลายน้ำได้มาด้วย เมื่อน้ำระเหยไปเกลือระเหยไม่ได้จึงมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับ

หนึ่งเป็นจุดอิมิตัวของสารละลายของเกลือนั้น เกลือจะตกผลึกออกมาภายในช่องว่างเล็กๆ หรือรูพรุนของเนื้อวัสดุ แต่เนื่องจากความชื้นในวัสดุไม่คงที่ และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศก็ไม่คงที่ เพราะฉะนั้นในบางขณะความชื้นระเหยออกไปได้มากจนวัสดุแห้ง เกลือจะตกผลึก และในบางขณะความชื้นระเหยออกไปได้น้อย เนื้อวัสดุเปียกเกลือจะละลายน้ำกลายเป็นสารละลาย ซึ่งในวันหนึ่งๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวกลับไปมาหลายสิบครั้ง การที่เกลือตกผลึกซ้ำแล้วซ้ำเล่าอยู่ภายในเนื้อที่จำกัด ผลึกของเกลือที่มีปริมาตรโตขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตรงมุมจะขยายขนาดขึ้น จนในที่สุดผลึกที่โตขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิดแรงดันตรงผนังของช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุ และจะระเบิดให้ผนังของช่องว่างภายในเนื้อวัสดุแตกออก วัสดุก่อสร้างนั้นๆ จะมีสภาพเปื่อยยุ่ยหลุดร่วงออกมาเป็นผุยผง ปฏิกฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นมากตรงบริเวณที่น้ำระเหยออกจากวัสดุก่อสร้างได้มากที่สุด เมื่อนำผงวัสดุที่หลุดร่วงเหล่านี้ไปวิเคราะห์จะพบเกลือที่ละลายน้ำได้อยู่เสมอ

เกลือที่เกิดขึ้นนี้เป็นเกลือที่ละลายน้ำ จึงถูกฝนชะล้างออกไปเรื่อยๆ คงเหลือแต่วัสดุก่อสร้างที่สึกกร่อนผุพังลงไปทุกที เพราะเมื่อผิวเดิมผุเปื่อยและถูกฝนชะออกไป ส่วนที่อยู่ลึกถัดเข้าไปก็จักกลายเป็นที่มีเกลือมาสะสมอยู่ และจะผุเปื่อยหลุดร่วงหายไปทีละชั้น เป็นเช่นนี้เรื่อยไป

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้วัสดุก่อสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ได้ก็คือ การที่วัสดุก่อสร้างแทบทุกชนิดมีเนื้อพรุนยอมให้อากาศและน้ำผ่านเข้าออกได้รูพรุนในเนื้อวัสดุก่อสร้างเรียกว่า capillary tube มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1-10 ไมโครเมตร วัสดุก่อสร้างทั่วไปมีรูพรุนขนาดต่างๆ กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อวัสดุก่อสร้าง

ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ช่วยสนับสนุนให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้ดีขึ้นคือ องค์ประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุก่อสร้างเป็นคาร์บอเนต ซิลิเกต อะลูมิเนต ออกไซด์ ฯลฯ ซึ่งล้วนแล้วแต่มี ออกซิเจน หรือ ไฮดรอกซิล (hydroxyl) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ออกซิเจนมีขั้วไฟฟ้าลบ และไฮดรอกซิลมีทั้งขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ขั้วไฟฟ้าบวกและลบนี้สามารถดึงดูดสารเคมีอื่นๆ ที่มีขั้วบวกและขั้วลบอยู่ด้วย เช่น น้ำ ดังนั้นผิวหน้าของรูพรุนในวัสดุก่อสร้างที่ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าบวกและลบอยู่มากมาย จึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้ วัสดุพวกนี้จึงมีชื่อเรียกว่า water-loving material หรือ hydrophilic หลังจากนั้นโมเลกุลของน้ำก็จะดึงดูดน้ำอีกหลายๆ โมเลกุลเข้ามาเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำสามารถแทรกซึมอยู่เต็มภายในรูเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุได้ นี่คือการอธิบายว่าเหตุใดวัสดุก่อสร้างจึงเปียกน้ำหรือขึ้นได้

น้ำหรือความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่งในการเสื่อมสภาพของโบราณสถาน น้ำ หรือความชื้นช่วยให้ปฏิกิริยาต่างๆ เกิดได้เร็วขึ้น โดยน้ำหรือความชื้นอาจเข้าไปทำปฏิกิริยากับวัสดุก่อสร้างโดยตรง หรือทำหน้าที่เป็นตัวกลางในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุก่อสร้างกับสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ปฏิกิริยาเหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและคุณสมบัติของดินที่เป็นฐานรากของโบราณสถาน และของวัสดุก่อสร้าง

เอง เช่น ทำให้วัสดุก่อสร้างมีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมต่ำลง มีรุกรุนมากขึ้น และที่สำคัญคือ ทำให้มีผลึกเกลืออยู่ภายในเนื้อวัสดุก่อสร้าง

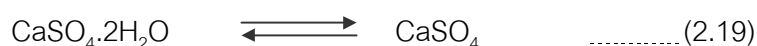
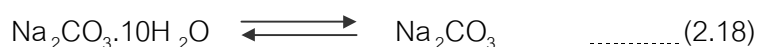
แรงดึงดูภายในรุกรุนของวัสดุก่อสร้างมีค่าต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางรุกรุนนั้นๆ รุกรุนที่มีขนาดเล็กจะมีแรงดึงดูสูง โดยทั่วไปรุกรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร แรงดึงดูจะสูงมาก แรงดึงดูนี้ผลอย่างยิ่งต่อการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุก่อสร้าง

การตกผลึกของเกลือในรุกรุนของวัสดุเกิดขึ้นเมื่อมีสารละลายเกลือสะสมอยู่ในเนื้อวัสดุ และมีน้ำระเหยออกไป เกลือจะตกผลึกอยู่ภายในช่องนั้น ถ้ารุกรุนของวัสดุมีขนาดใหญ่และเล็กปนกัน สารละลายของเกลือจะอยู่ในรุกรุนขนาดเล็กๆ มากกว่ารุกรุนขนาดใหญ่ๆ และผลึกเกลือที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กๆ ในกรณีนี้จะไม่มีความดันให้เนื้อวัสดุแตกหักมากนัก แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีรุกรุนที่มีขนาดเล็กน้อยและมีรุกรุนขนาดใหญ่อยู่มาก ขนาดของผลึกจะโตมากขึ้น ทำให้เกิดแรงดันภายในช่องว่างภายในเนื้อวัสดุก่อสร้างแตกหักผุเปื่อยเป็นวงได้

นอกจากนี้ เกลือหลายชนิดมีคุณสมบัติดูดและคายความชื้นได้เมื่อสิ่งแวดล้อมมีความชื้นสูง เกลือเหล่านี้จะดูดความชื้นเข้ามาแล้วกลายเป็นสารละลาย เมื่อความชื้นในสิ่งแวดล้อมลดต่ำลง เกลือจะคายความชื้นออกไป และตกผลึกคุณสมบัติข้อนี้ช่วยให้วัสดุก่อสร้างดูดและคายความชื้นได้ดีขึ้นยังผลให้เกิดการตกผลึกซ้ำแล้วซ้ำเล่าอยู่ภายในเนื้อวัสดุมากขึ้น มากกว่าเกลือที่ไม่ดูดและคายความชื้น ตัวอย่างเช่น โซเดียมคลอไรด์ จะดูดน้ำเข้ามาในโมเลกุลได้เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 75 เปอร์เซ็นต์

แรงดันภายในรุกรุนของเนื้อวัสดุเกิดจากกลไก 2 อย่าง ดังนี้

- 1) เกลือที่เกิดจากอุณหภูมิต่ำ เมื่อสูญเสียน้ำไป จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น
- 2) เกลือที่เกิดจากอุณหภูมิต่ำ จะดูดน้ำเข้าในผลึกเกลือและทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้น ผลึกเกลือ เหล่านี้เรียกว่า เกลือที่มีน้ำผลึก (hydrated crystal) น้ำที่ผลึกดูดเข้ามาในโมเลกุล เรียกว่า น้ำผลึก (water of crystallization) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือความชื้นสัมพัทธ์ลดลง ผลึกเหล่านี้จะคายน้ำออกมาเป็นเกลือที่ปราศจากน้ำผลึก (anhydrous crystal) ซึ่งมีขนาดเล็กลงตัวอย่างของเกลือที่มีน้ำผลึก และเกลือที่ปราศจากน้ำผลึกที่พบบ่อยบนโบราณสถานได้แก่



การดูดน้ำและคายน้ำของผลึกเกลือเหล่านี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เช่น เกลือของ โซเดียมซัลเฟต ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 32.4 องศาเซลเซียส จะอยู่ในรูปของ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ แต่เมื่อ อุณหภูมิสูงกว่า 32.4 องศาเซลเซียส จะอยู่ในรูปของ Na_2SO_4 การเปลี่ยนแปลงจาก Na_2SO_4 ไปเป็น $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ทำให้ผลึกมีปริมาตรเพิ่มขึ้น 308 เปอร์เซ็นต์ และในทำนองเดียวกันนี้ เกลือของ แมกนีเซียมซัลเฟตจะอยู่ในรูปของ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิระหว่าง -3.9 ถึง 1.8 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คืออยู่ระหว่าง 1.8 ถึง 48.3 องศาเซลเซียส จะอยู่ในรูปของ $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ การ เปลี่ยนแปลงจาก $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ไปเป็น $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ทำให้ผลึกมีปริมาตรเพิ่มขึ้น 170 เปอร์เซ็นต์

การเกิดเกลือมีได้หลายแบบ เช่น

1) เกิดที่ผิวของวัสดุก่อสร้าง ปฏิกิริยาการเกิดเช่นนี้เกิดเมื่อมีอัตราการระเหยไม่สูงมาก นัก และที่ผิวของวัสดุยังเปียกชื้นอยู่บ้างทำให้เกิดการตกผลึกที่ผิว นอกจากนี้รูปพรุนของเนื้อวัสดุที่มีเนื้อ แน่นหรือมีรูปพรุนขนาดเล็กๆ เช่น อิฐที่มีเนื้อแน่น หินเนื้อละเอียด ฯลฯ จะมีแรงดึงดูดในรูปพรุนสูง ทำให้อ น้ำ หรือสารละลายของเกลือมาออกกันอยู่ที่ผิวของวัสดุมาก เมื่อน้ำระเหยไปเกลือจึงตกผลึกอยู่ที่ผิว

2) เกิดในเนื้อของวัสดุก่อสร้าง ถ้ามีลมพัดแรง หรือมีแสงแดดที่ร้อน จะทำให้อัตรา การระเหยเร็วขึ้น ที่ผิววัสดุจึงแห้งปราศจากความชื้น เกลือจึงตกผลึกอยู่ภายในเนื้อวัสดุก่อสร้าง หรือ อาจเกิดจากการที่วัสดุก่อสร้างมีเนื้อหยาบ มีรูปพรุนใหญ่ ซึ่งมีแรงดึงดูดน้ำหรือสารละลายของเกลือไม่ มากนัก น้ำหรือสารละลายของเกลือจึงสะสมอยู่ภายในมากกว่าที่ผิว เมื่อน้ำระเหยออกไปผ่านรูปพรุนที่ ผิว เกลือจะตกผลึกอยู่ที่ผิวหน้าของวัสดุก่อสร้างซึ่งส่วนใหญ่จะมองไม่ค่อยเห็นผลึกเกลือ แต่วัสดุ ก่อสร้างมีอาการฟูเปื่อย

บางครั้งพบว่ามีเกลือเกิดขึ้นกระจุกกระจายเป็นแห่งๆ ไม่สม่ำเสมอ เช่น อิฐ บางส่วนมีผลึก เกลือ บางส่วนไม่พบผลึกเกลือ ทั้งนี้เพราะขนาดของรูปพรุนด้วยเช่นกัน อิฐส่วนที่มีเนื้อแน่นเกลือจะตก ผลึกที่ผิว ส่วนที่มีเนื้อหยาบมีรูปพรุนขนาดใหญ่เกลือจะตกผลึกอยู่ข้างใน ในกรณีที่มีปูนก่อ ถ้าปูนก่อ เนื้อแน่นกว่าอิฐหรือหิน น้ำจะระเหยออกที่ผิวของอิฐหรือหินมากกว่าที่ปูนก่อ ทำให้อิฐหรือหินฟูเปื่อย ส่วนปูนก่อจะยังคงสภาพดีอยู่ ในทางตรงกันข้าม ถ้าอิฐหรือหินเนื้อแน่นกว่าปูนก่อ จะไม่ยอมให้น้ำ ระเหยผ่าน น้ำจึงต้องระเหยที่ปูนก่อ ทำให้เกิดผลึกเกลือบนปูนก่อ ในกรณีนี้ปูนก่อจะฟูเปื่อยในขณะที่ อิฐหรือหินยังคงแข็งแรงดีอยู่ นอกจากนี้ในบางครั้งจะพบว่าหินทรายบางชนิดฟูเปื่อยหลุดร่วงออกเป็น ชิ้นๆ คล้ายกับดอกกระหล่ำปลี สาเหตุเกิดจากการเปียกและแห้งสลับกัน เมื่อเปียกน้ำ น้ำจะแทรกซึม เข้าไปในเนื้อหินจนถึงความลึกระดับหนึ่ง น้ำที่ซึมเข้ามาจะละลายสารที่สามารถละลายน้ำได้ และขัง อยู่ภายใน เมื่อน้ำระเหยออกที่ผิว สารละลายนี้จะเคลื่อนที่มาอยู่ใกล้ๆ ผิวหน้า เกลือจะตกผลึกอยู่ ข้างใน การเปียกและแห้งสลับกันนานๆ นั้น จะทำให้เปลือกชั้นนอกแข็งแรงกว่าส่วนที่อยู่ชั้นใน เพราะ

ที่ชั้นในวัสดุประสาน (cementing material) ละลายออกไปเรื่อยๆ แม้แต่ซิลิกาที่ถูกละลายได้ในกระบวนการดังกล่าว เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ เข้า บริเวณที่มีการตกลึกซึ้งแล้วซึ้งแล้วจะอ่อนนุ่มเปื่อย ในขณะที่เปลือกชั้นนอกยังแข็งแรง ทำให้หินหลุดร่อนออกเป็นชั้นๆ ซึ่งพบว่าเกลือแคลเซียมซัลเฟต มีบทบาทสำคัญในปรากฏการณ์เช่นนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหินที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ด้วย

การที่ไม่พบผลึกเกลือบนผิววัสดุก่อสร้างไม่ได้หมายความว่าในวัสดุก่อสร้างนั้นๆ ไม่มีเกลือ แต่เกลือที่ตกลึกแล้วอาจจะถูกฝนชะออกไป หรือเกลืออาจดูดความชื้นกลายเป็นสารละลาย แล้วแทรกซึมกลับเข้าไปในวัสดุก่อสร้างใหม่ ถ้าฝนตกติดต่อกันเป็นเวลานานเกลือจะแทรกซึมเข้าไปได้ลึกมาก เมื่อฝนหยุดน้ำจะเริ่มระเหยออกที่ผิว เกลือจะเคลื่อนที่มาใกล้ๆ ผิว ในฤดูแล้งจึงพบผลึกเกลืออยู่บนผิววัสดุก่อสร้างมากกว่าในฤดูฝน ยกเว้นในส่วนที่ไม่โดนฝนสาดจะพบเกลือได้ในทุกฤดูกาล

ความยากง่ายในการตกลึก ขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลึก และส่วนผสมของสารละลายของเกลือ เกลือบางชนิดนั้นจะไม่ค่อยตกลึกออกมาให้เห็น เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพราะดูดความชื้นได้ดีมากมักอยู่ในรูปของสารละลาย เกลือโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ตกลึกได้ง่าย แม้มีปริมาณน้อยชนิดเดียวก็ตกลึกได้ เกลือโพแทสเซียมซัลเฟตตกลึกยาก จะตกลึกก็ต่อเมื่อมีเกลืออื่นๆ ร่วมอยู่ด้วย ผลึกเกลือเกิดได้หลายรูปแบบ ลักษณะผลึกอาจเป็นรูปเข็ม รูปแท่ง รูปเหลี่ยม ฯลฯ ขึ้นอยู่กับชนิดของเกลือนั้นๆ และปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ องค์ประกอบ และสิ่งแวดล้อมในสารละลาย สภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด ความชื้น ความพรุนของวัสดุก่อสร้าง อัตราเร็วในการระเหย เป็นต้น

เกลือชนิดเดียวกันภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างกัน อาจตกลึกรูปร่างต่างกัน บางครั้งพบว่าแม้ในจุดเดียวกันผลึกที่เกิดขึ้นในตอนแรกๆ มีรูปร่างต่างจากผลึกที่เกิดขึ้นในระยะเวลาต่อมา หรือเกลือที่ตกลึกโดยมีรูปร่างแบบหนึ่งแล้ว เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป เกลือนั้นๆ จะตกลึกใหม่และมีรูปร่างแตกต่างไปจากเดิม เพราะฉะนั้นการดูรูปร่างของผลึกที่ปรากฏบนวัสดุก่อสร้าง ไม่อาจบอกได้ว่าเป็นเกลือชนิดใด

ผลึกเกลือที่เกิดขึ้นมักอยู่รวมกันเป็นกระจุก หรือเป็นคราบหนาๆ บนผิววัสดุก่อสร้าง หรือภายในรูพรุนของวัสดุก่อสร้าง มักพบบ่อยบนวัสดุก่อสร้างที่ขึ้นแฉะ เช่น ผนังที่ขึ้นจากความชื้นจากใต้ดิน (rising damp) ส่วนที่มีอัตราการระเหยต่ำ เช่น ส่วนที่อยู่ในที่ร่ม หรือผนังภายในอาคาร และมักพบบนส่วนล่างของผนังมากกว่าส่วนบนที่สูงขึ้นไป ทั้งนี้เพราะผนังด้านล่างมักชื้นกว่าด้านบน แต่ถ้าความชื้นมากเกินไปก็ไม่พบผลึกเกลือ เพราะความชื้นสูงทำให้ไม่เกิดสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated) เกลือไม่สามารถตกลึกลงมาได้ การตกลึกจะเริ่มขึ้นต่อเมื่อวัสดุเริ่มแห้ง น้ำจะระเหยออกไป ทำให้สารละลายของเกลือมีความเข้มข้นสูงขึ้นไปจนถึงจุดอิ่มตัวยิ่งยวด เกลือจึงเริ่มตกลึกลงมา ถ้าอัตราการระเหยไม่สูงมากเกินไป เกลือจะตกลึกได้ผลึกที่มีรูปร่างแบบ isometric เมื่อวัสดุก่อสร้าง

เริ่มแห้งขึ้น (แต่ยังชื้นอยู่) จะพบผลึกเกลือลักษณะเป็นแท่ง เล็กๆ หรือคล้ายๆ ขนหรือเส้น บนผิวนอกสุดของวัสดุอาจอยู่บนกระจุกเกลือที่เกิดขึ้น ตอนแรกๆ บนผิวที่เกือบจะแห้ง จะพบผลึกแบบนี้มากขึ้น ขนาดของผลึกจะเล็กและบางกว่าผลึกที่พบบนผิวที่ยังไม่แห้ง ลักษณะเป็นเส้นเล็กๆ ยาวๆ เป็นเส้นตรง หรือโค้งงอเล็กน้อย ผลึกแต่ละเส้นมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 1 ไมโครเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร หรือ มากกว่า ผลึกจะยิ่งเล็กและบางมาก เมื่ออัตราการระเหยไม่สูงมากวัสดุก่อสร้างขึ้นเพียงเล็กน้อย และผิวของวัสดุก่อสร้างมีความหนาแน่นสูง เช่น ผนังที่ทาสี หรือฉาบปูนซีเมนต์ ในทางตรงข้ามถ้าอัตราการระเหยที่ผิวสูง วัสดุก่อสร้างค่อนข้างชื้น และผิวของวัสดุก่อสร้างพรุน ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และหนากว่า

จากการสังเกตของการโตของผลึกเกลือบนวัสดุก่อสร้างที่มีเนื้อพรุน เช่น อิฐ กระเบื้องดินเผา พบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 32 เปอร์เซ็นต์ สารละลายของเกลือส่วนใหญ่ตกผลึกเป็นผลึก เล็กๆ อยู่รวมกันเป็นกระจุกหรือเกาะติดกันเป็นแผง และต่อมาเมื่อวัสดุแห้งลงเรื่อยๆ จะมีการตกผลึก เป็นผลึกเล็กๆ รูปร่างเป็นแท่งๆ หรือคล้ายเส้นผม ตั้งฉากกับผิวของวัสดุและมักมีผลึกเล็กๆ รูปเข็ม แทรกปนอยู่ด้วย การตกผลึกจะใช้เวลาน้อยมากและจะพบเกลือมาก สภาวะเช่นนี้เกิดขึ้นมากในฤดูร้อน ซึ่งอากาศร้อนและแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนวัสดุก่อสร้าง หรือโบราณสถานส่วนที่รับแดดและลมมากกว่าส่วนอื่นๆ แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 69 เปอร์เซ็นต์ จะไม่ค่อยพบผลึกแบบ isometric และผลึกแบบแท่งอยู่บนผิว เพราะในสภาวะเช่นนั้นจะไม่เกิดการอิมิตัวยิ่งยวด ซึ่งจากผลการสำรวจพบว่าผลึกเกลือที่มักพบบนโบราณสถานมีได้ทุกแบบที่กล่าวมาข้างต้น ผลึกแบบ isometric มักพบภายในช่องว่างหรือรูพรุนภายในเนื้อวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอิฐจะเห็นได้ชัดที่สุด ส่วนผลึก รูปเข็มหรือรูปแท่งมักพบบนผิวนอกสุดของวัสดุก่อสร้าง ส่วนที่หันรับแดดและลม

จะเห็นได้ว่า เกลือและความชื้น ต่างก็มีบทบาทต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุก่อสร้างเท่าเทียมกันอย่างไม่สามารถแยกจากกันได้เด็ดขาด และมักพบปรากฏการณ์ดังกล่าวควบคู่กันเสมอ ถ้ามีเกลืออยู่โดยปราศจากความชื้น เกลือก็จะเคลื่อนที่ไม่ได้ไม่สามารถก่อให้เกิดปัญหา ถ้ามีเพียงความชื้นแต่ปราศจากเกลือ วัสดุก่อสร้างคงไม่ผุพังอ่อนนุ่มถึงระดับนี้

นอกจากนี้ความพรุนของวัสดุก่อสร้างเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผุเปื่อยดังกล่าว หากโบราณสถานประกอบด้วยวัสดุก่อสร้างหลายชนิดผสมกัน เช่น อิฐที่สอและฉาบด้วยปูนซีเมนต์ ผนังที่ประดับปูนปั้น กระจก กระเบื้อง เคลือบ หินอ่อน หินขัด ฯลฯ น้ำจะแทรกซึมเข้ามาระเหยที่ผิวของวัสดุก่อสร้างที่พรุนได้มากกว่าวัสดุก่อสร้างที่มีความหนาแน่นสูงมาก เพราะฉะนั้นเกลือจึงมาสะสมในเนื้อวัสดุที่พรุนกว่าได้มากกว่า และทำให้วัสดุส่วนนั้นผุเปื่อยไปในที่สุด ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น หินอ่อน กระเบื้องเคลือบ หินขัด ปูนซีเมนต์ ฯลฯ จะยังสภาพแข็งแรง ตัวอย่างที่พบเสมอๆ คือ

การที่ปูนขาวและภาพจิตรกรรมฝาผนังในวัดวาอารามต่างๆ ผุเปื่อยหลุดร่วง ออกไปเป็นแถบๆ ตามแนวระดับที่ความชื้นจากใต้ดินแทรกซึมขึ้นมา

ปรากฏการณ์เช่นนี้ พบมากบนโบราณสถานที่ผ่านมาการบูรณะซ่อมแซมในอดีต โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นปูนก่อแทนปูนขาวซึ่งเคยใช้กันมาแต่โบราณ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความหนาแน่นและแข็งกว่าอิฐ ปูนขาว ปูนปั้น และหินทรายมาก ความชื้นจึงมักมากระเหยที่ผิวของวัสดุเหล่านี้ที่พูนกว่า ทำให้มีเกลือมาสะสมมาก ทั้งที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต และเกลือที่เติมลงไปในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น เกลือยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ใช้ผสมในปูนซีเมนต์ เพื่อหน่วงเหนี่ยวให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้าลง จะได้มีเวลาในการปฏิบัติงานมากขึ้น

เกลือที่ละลายน้ำได้เหล่านี้จึงละลายอยู่ในปูนซีเมนต์ สารละลายของเกลือเหล่านี้จึงแทรกซึมเข้าไปในเนื้ออิฐ หิน ปูน ฯลฯ ได้อย่างรวดเร็วในระหว่างการก่อหรือฉาบ ทำให้อิฐ หรือหิน ส่วนที่อยู่ใกล้กับปูนซีเมนต์มีเกลือที่ละลายน้ำได้สะสมอยู่มากกว่าส่วนอื่นๆ จึงผุเปื่อยอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ปูนซีเมนต์ยังคงสภาพแข็งแรงดี

เกลือที่พบมากบนโบราณสถาน ได้แก่ gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halite (NaCl), thenardite (Na_2SO_4), calcite (CaCO_3) และ mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

เกลือที่พบบ้างเล็กน้อยบนโบราณสถาน ได้แก่ hexahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), darapskite ($\text{Na}_3(\text{NO}_3)\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), bloedite ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$) และ sodanite (NaNO_3)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การที่เกลือบนโบราณสถานจะเป็นชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับ

- 1) องค์ประกอบของวัสดุก่อสร้าง
- 2) สภาพแวดล้อม

โบราณสถานที่ตั้งอยู่ใกล้ชุมชนมีปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้สูง และยังประกอบไปด้วยเกลือหลายชนิด เพราะนอกจากจะมีเกลือที่เป็นองค์ประกอบของดินแล้ว ยังมีเกลืออื่นๆ ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอีกมากมาย จึงมีโอกาสพบเกลือชนิดแปลกๆ หลายชนิด

ปรากฏการณ์เหล่านี้จะรุนแรงยิ่งขึ้นถ้าหากโบราณสถานดังกล่าวตั้งอยู่ริมแม่น้ำ ลำคลอง หรือแหล่งน้ำอื่นๆ ระดับน้ำใต้ดินบริเวณดังกล่าวจะสูงมาก และมักแปรเปลี่ยนขึ้นๆ ลงๆ ตลอดเวลา ตามอิทธิพลของกระแสน้ำ และระดับน้ำทะเล ทำให้เกิดการซ้ำรดผุเปื่อยเป็นบริเวณกว้างกว่าโบราณสถานที่อยู่ห่างไกลแม่น้ำลำคลอง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด คือ วัดวาอารามเก่าๆ บริเวณริมฝั่ง แม่น้ำเจ้าพระยา และลำคลองต่างๆ ในกรุงเทพมหานคร ธนบุรี นนทบุรี ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา ฯลฯ จะปรากฏ

อาการดังกล่าวทุกแห่ง เกลือที่มักพบบนโบราณสถานเหล่านี้ มักเป็นยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แคลไซต์ (CaCO_3), thenardite (Na_2SO_4), โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ hexahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

เกลือ hexahydrate และ epsomite อาจเกิดจากการที่ใช้น้ำขุ่นที่มีแมกนีเซียมปะปนอยู่ เช่น อาจมีการใช้น้ำขุ่นที่มาจากหินปูนโคโลไมต์ โคโลไมต์เป็นหินปูนชนิดที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนตกับแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ร่วมกัน เมื่อแมกนีเซียมคาร์บอเนตทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีซัลเฟตจะได้แมกนีเซียมซัลเฟตที่มีน้ำผลึกต่างๆ กัน ที่พบบ่อยเป็น hexahydrate ซึ่งมีน้ำผลึก 6 โมเลกุล และ epsomite ซึ่งมีน้ำผลึก 7 โมเลกุล

ข้อมูลเหล่านี้สามารถช่วยให้ความกระจ่างเกี่ยวกับสาเหตุที่ทำให้วัสดุก่อสร้างชำรุด ผุเปื่อยว่าเกิดจากการกระทำของเกลือและความชื้น มิใช่เกิดจากการที่วัสดุก่อสร้างนั้นๆ หมดสภาพ หรือหมดอายุไปโดยตัวของมันเองตามความเชื่อของช่างในอดีต

2.5.3 ตัวอย่างการกัดกร่อน

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีโบราณสถานอยู่มากมาย และกระจัดกระจายทั่วไปตามภาคต่างๆ ของประเทศ เนื่องจากลัทธิแต่เคยเมืองซึ่งมีอารยธรรมที่เก่าแก่ทั้งสิ้น ดังนั้นในการจัดการป้องกันและแก้ไขการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจากต้องใช้วิธีที่แตกต่างกันออกไป แม้การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอาจแสดงออกมาในลักษณะที่คล้ายกันก็ตาม ดังนั้นจึงจำเป็นที่เราจะต้องศึกษาหาสาเหตุ และทำการซ่อมแซม แก้ไข หรือป้องกันของโบราณสถานนั้นๆ โดยเฉพาะการกัดกร่อนเกิดขึ้นมากมายและเป็นปัญหาเกี่ยวกับโบราณสถานมาก ดังจะข้อยกตัวอย่างของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในโบราณสถานต่างๆ ของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา



รูปที่ 2.6 สภาพผนังของเมรุองค์มูมด้านทิศใต้ในปัจจุบันไม่มีหลังคาคลุม



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 ภาพปูนปั้นเล่าเรื่องพุทธประวัติบริเวณกำแพงของเมรุ

(ก) ภาพปูนปั้นเต็มองค์

(ข) ภาพปูนปั้นส่วนล่างซึ่งเกิดการกัดกร่อนจนไม่เห็นลวดลายของภาพ

จากรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 เป็นภาพปูนปั้นที่อยู่ในบริเวณของวัดไชยวัฒนาราม ซึ่งตั้งอยู่ริมฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา นอกเขตกำแพงเมืองเก่าด้านตะวันตกที่ ตำบลบ้านป้อม อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตัววัดตั้งหันหน้าไปทางทิศตะวันออก ทำให้น้ำวัดหันลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา



รูปที่ 2.8 พระพุทธรูปที่สร้างขึ้นมาจากศิลาแลง ซึ่งถูกทำลายทั้งโดยมนุษย์จากการเผาทำลายกรุงศรีอยุธยา สงครามกับพม่า ในสงครามเก้าทัพ และจากการกัดกร่อนผู้สลายจากธรรมชาติ

ซึ่งจะเห็นว่าสถานที่ดังกล่าวข้างต้นนี้ มีสภาพชำรุด และเสื่อมโทรมมาก ทั้งรูปปูนปั้นของวัดไชยวัฒนาราม หรือบริเวณกำแพงของวัดไชยวัฒนาราม และวัดหน้าพระเมรุ ซึ่งจะเห็นว่าปูนปั้นมีลักษณะร่อนหรือหลุดออกจนเผยให้เห็นอิฐภายใน ซึ่งไม่ว่าจะเป็นอิฐภายใน หรืออิฐก่อที่เราเห็นนั้นก็ยังมีสภาพที่แตกหัก ชำรุด ทрудโทรมลง เช่นกัน

2.5.4 การดูแลรักษาหลักการสำคัญในการดูแลรักษาศิลปะโบราณวัตถุ

เนื่องจากศิลปะโบราณวัตถุเป็นมรดกทางวัฒนธรรม และยังเป็นวัตถุหลักฐานที่สามารถแสดงถึง วิถีชีวิต สังคม ประเพณี วัฒนธรรม ตลอดจนเทคโนโลยีของชุมชนโบราณในยุคสมัยต่างๆ ที่อาศัยอยู่บนผืนแผ่นดินนี้มาแต่โบราณ ซึ่งทุกวันนี้ ศิลปะโบราณวัตถุส่วนใหญ่ที่เรามีอยู่จะอยู่ในสภาพที่ชำรุดทรุดโทรม เนื่องจากศิลปะโบราณวัตถุนั้นมีอายุยาวนานหลายร้อยหลายพันปี ศิลปะโบราณวัตถุบางส่วนเคยผ่านการใช้งานมาอย่างหนัก ประกอบกับการขาดการดูแลรักษาด้วยวิธีที่ถูกต้องมาเป็นเวลานาน สภาพชำรุดจึงทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนบางส่วนถึงกับผุพังสูญสลายไป ส่วนศิลปะโบราณวัตถุส่วนที่ยังคงอยู่ในสภาพที่มั่นคงแข็งแรงอยู่ในขณะนี้ นับวันก็ยังมีแนวโน้มที่จะชำรุดเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควรเช่นกัน หากการเก็บรักษา การดูแล หรือการจัดแสดงด้วยวิธีที่ไม่ถูกต้อง นอกจากนี้ ศิลปะโบราณวัตถุมีหลายชนิดเสื่อมสภาพลงไปทุกขณะเนื่องจากสาเหตุภายในตัวเอง วัสดุบางชนิดเริ่มมีการเสื่อมสภาพตั้งแต่มีการผลิต เนื่องมาจากองค์ประกอบบางอย่างในตัวโบราณวัตถุเอง ก่อให้เกิดสภาพการชำรุดเสื่อมสภาพได้ เช่น กระดาษบางชนิดที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ทำให้เกิดกรดในเนื้อกระดาษ เพราะสารเคมีบางชนิดที่ใช้ในกระบวนการผลิตทำให้กระดาษเปื่อย กรอบ เปลี่ยนสี น้ำหมึก หรือสีที่ใช้ในการพิมพ์บนกระดาษและผ้ามีฤทธิ์สามารถกัดกินเส้นใย จนเกิดการขาดทะลุได้ เป็นต้น ศิลปะโบราณวัตถุที่กำลังชำรุดเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุในตัวเองเหล่านี้ ก็จะต้องทำการดูแลรักษาอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษ เพื่อช่วยในการชะลออัตราการชำรุดเสื่อมสภาพให้ช้าลงมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้นหัวใจที่สำคัญในการอนุรักษ์ศิลปะโบราณวัตถุ คือ การปกป้อง ค้ำครอง ป้องกันไม่ให้ศิลปะโบราณวัตถุสูญหาย หรือชำรุดเสื่อมสภาพอีกต่อไป ดังนั้นบุคลากรที่ทำหน้าที่ดูแลรักษา ศิลปะโบราณวัตถุ จำเป็นจะต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับชนิดและคุณสมบัติของศิลปะโบราณวัตถุ ตลอดจนกระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพของศิลปะโบราณวัตถุแต่ละชนิดด้วย เพื่อจะสามารถพิจารณาหาทางป้องกันและหลีกเลี่ยงจากปัจจัยที่ทำให้เกิดการชำรุดทรุดโทรม

ดังนั้นในปัจจุบันแนวความคิดในการอนุรักษ์ศิลปะโบราณวัตถุจึงเปลี่ยนไปจากเดิม ในระยะ 20-30 ปีที่ผ่านมา นักอนุรักษ์นิยมใช้สารเคมีนานาชนิดในการแก้ปัญหา ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการใช้สารเคมีมากเกินไปจนความจำเป็น และขาดการศึกษาวิจัยเพื่อประเมินผลเสียในระยะยาวที่เกิดจากสารเคมี

ที่นำมาใช้นี้ แต่จากความก้าวหน้าในทางเทคโนโลยีที่มีมากขึ้นในปัจจุบันจึงมีส่วนช่วยนักวิทยาศาสตร์และนักอนุรักษ์ให้สามารถศึกษาวิจัยได้มากขึ้น เพื่อจะได้พัฒนาวิธีการอนุรักษ์ศิลปะโบราณวัตถุได้อย่างกว้างขวาง และลึกซึ้งมากขึ้น ผลการศึกษาวิจัยทำให้ได้ทราบว่าวิธีการอนุรักษ์ศิลปะโบราณวัตถุที่นำมาใช้นั้นให้ผลเสียแก่ศิลปะโบราณวัตถุ หรือไม่ นั่นคือพยายามเลือกใช้วิธีธรรมชาติให้มากที่สุด และหากจำเป็นจะต้องใช้สารเคมีก็จะพยายามเลือกใช้สารเคมีที่ได้ทำ การศึกษาวิจัยมาแล้วว่าไม่ก่อให้เกิดผลเสียแก่ศิลปะโบราณวัตถุทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งทั้งนี้จะเป็นการช่วยยืดอายุของศิลปะโบราณวัตถุ ออกไปให้ยาวนานที่สุด โดยให้มีสิ่งแปลกปลอมอยู่ในตัวศิลปะโบราณวัตถุน้อยที่สุด การเปลี่ยนแปลงสภาพหรือองค์ประกอบของศิลปะโบราณวัตถุ โดยการแทนที่หรือเติมแต่ง ตลอดจนการอัดฉีด การฉาบ เคลือบสารเคมีจำนวนมากลงไปบนศิลปะโบราณวัตถุ เป็นการทำลายหรือบิดเบือนหลักฐานสำคัญอันควรเก็บรักษาไว้ให้อนุชนรุ่นหลังของเราได้ศึกษาค้นคว้าต่อไป ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าวิธีการอนุรักษ์ศิลปะโบราณวัตถุที่ดีที่สุด มีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือการป้องกันไม่ให้ศิลปะโบราณวัตถุเกิดการชำรุดเสื่อมสภาพมากขึ้น นี่คือการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ ไม่ใช่ปล่อยให้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพก่อนจึงทำ การสงวนรักษาซ่อมแซม ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ (จิราภรณ์ อรัณยะนาค, 2539)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าในศิลปะโบราณวัตถุจะประกอบไปด้วยวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิดด้วยกัน โดยวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติต่างกัน และมีกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกัน ทางวิทยาศาสตร์ได้แบ่งวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของศิลปะโบราณวัตถุออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ อินทรีย์วัตถุ และอนินทรีย์วัตถุ ดังนั้นจึงสามารถแยกพิจารณาตามองค์ประกอบของวัสดุเพื่อหาสาเหตุ และทำการอนุรักษ์ต่อไปได้

ศิลปะโบราณวัตถุที่มีองค์ประกอบเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ จะไม่ค่อยคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เพราะโครงสร้างบอบบางและประกอบด้วยเซลเป็นส่วนใหญ่ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้อินทรีย์วัตถุยังเป็นอาหารที่ดีของสัตว์ เช่น หนู ตลอดจนแมลง และจุลินทรีย์ต่างๆ ทำให้อินทรีย์วัตถุมีแนวโน้มที่จะเกิดการชำรุดเสียหายด้วยอัตราเร็วสูงมาก การดูแลรักษาวัตถุเหล่านี้จึงต้องการความเอาใจใส่เป็นพิเศษ

ส่วนศิลปะโบราณวัตถุประเภทที่มีองค์ประกอบเป็นอนินทรีย์วัตถุ ส่วนใหญ่จะแข็งแรงทนทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี เช่น เครื่องปั้นดินเผาและแก้ว จะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อได้รับความร้อน ความชื้น หรือแสงสว่าง เป็นต้น แต่มักเปราะแตกหักง่าย โลหะวัตถุส่วนใหญ่แข็งและเหนียวทนต่อแรงกด แรงดึงได้ดีมาก แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับความชื้น เกลือ ดิน ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ ฝุ่นละออง ฯลฯ ซึ่งอาจเกิดสนิมของโลหะ ที่พบบ่อยได้แก่ เครื่องเงินมักมี

การหมองคล้ำ ส้ำริดเกิดสนิมกัดกร่อน เหล็กเป็นสนิม เป็นต้น แต่ก็มีโลหะบางชนิดที่ไม่แข็งพอที่จะรับแรงขัดสีได้ เช่น ทอง ตะกั่ว จะหักงอ และมีรอยขีดขีดได้ง่าย

จะเห็นได้ว่าวัตถุแต่ละชนิดต่างมีจุดเด่นจุดด้อยที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงมีความต้องการในการดูแลรักษาที่แตกต่างกันไปเป็นพิเศษ การที่จะอนุรักษ์ศิลปะโบราณวัตถุให้อยู่ในสภาพดีตลอดเวลา ซึ่งผู้ที่ทำหน้าที่ดูแลรักษาจำเป็นต้องทำความรู้จักคุ้นเคย คุณสมบัติ และจุดอ่อนต่างๆ ในตัวของศิลปะโบราณวัตถุให้ถ่องแท้เสียก่อน ขั้นต่อไปจึงทำการเรียนรู้หาสาเหตุที่ทำให้ศิลปะโบราณวัตถุเกิดการชำรุดเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร แล้วจึงศึกษาวิธีป้องกันไม่ให้ศิลปะโบราณวัตถุเกิดการชำรุดเสื่อมสภาพต่อไปได้อีก ซึ่ง 3 ขั้นตอนนี้ถือเป็นสิ่งสำคัญมากในการอนุรักษ์ศิลปะโบราณวัตถุให้บรรลุวัตถุประสงค์

ทั้งนี้ความสำเร็จในการดูแลรักษาศิลปะโบราณวัตถุขึ้นอยู่กับ ประสิทธิภาพของภัณฑารักษ์ และเจ้าหน้าที่พิพิธภัณฑสถานในการปฏิบัติงานตามขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) การรักษาความปลอดภัย เพื่อเป็นการช่วยปกป้องคุ้มครองศิลปะโบราณวัตถุให้รอดพ้นจากโจรภัย อัคคีภัย อุทกภัย วาตภัย และภัยพิบัติอื่นๆ
- 2) ควรมีความสามารถในการที่จะแยกแยะและวิเคราะห์ ชนิด คุณสมบัติ จุดอ่อน จุดแข็งของศิลปะโบราณวัตถุ และสาเหตุที่ทำให้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพ
- 3) ความชำนาญในการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า
- 4) การจับต้องเคลื่อนย้ายศิลปะโบราณวัตถุด้วยวิธีการที่ถูกต้อง
- 5) การจัดแสดงและเก็บรักษาศิลปะโบราณวัตถุด้วยวิธีการที่ถูกต้อง
- 6) การควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสม

หากศิลปะโบราณวัตถุได้รับการดูแลรักษาเป็นอย่างดีตามแนวทางที่ได้กล่าวมาแล้ว อัตราการชำรุดเสื่อมสภาพจะลดลงอย่างมาก นั่นหมายความว่าศิลปะโบราณวัตถุอันเป็นมรดกทางวัฒนธรรมที่ล้ำค่าของไทยจะสามารถดำรงคงอยู่ต่อไปได้อีกยาวนาน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศิลปวัตถุในย่านที่มีแหล่งอุตสาหกรรม หรือในบริเวณเมืองใหญ่ มักจะได้รับผลกระทบจากก๊าซมลพิษที่ถูกปล่อยออกมา ก๊าซเหล่านี้มีการรวมตัวกับความชื้นจะกลายเป็นกรดที่สามารถกัดกร่อนเนื้อวัตถุ หรือบางครั้งทำปฏิกิริยากันกับแร่บางชนิดแล้วทำให้เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าเดิม และสามารถดูดความชื้นจากบรรยากาศได้ดี ทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นและเกิดรอยร้าวเล็กๆ ขึ้นในภายหลัง ซึ่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยา ที่เกิดขึ้นช้า อาจเป็นเดือน ปี หรือหลายปี

แต่การทดสอบการกัดกร่อนต้องการผลภายในเวลารวดเร็ว เพราะฉะนั้นจึงต้องรู้ระยะเวลาของการเกิดการกัดกร่อน โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือการเพิ่มความเข้มข้นของสารกัดกร่อนให้เข้มข้นมากขึ้นหลายเท่า (กัญจนา ตระกูลคู่ , 2530)

สาเหตุที่ทำให้โบราณสถานชำรุดเสื่อมสภาพ มาจากสาเหตุภายในโดยมักเกิดจากชนิดและคุณภาพของดินที่ฐานราก ชนิดและวัสดุก่อสร้าง และสาเหตุภายนอกเกิดจากสภาวะแวดล้อม เช่น ความร้อน, ความชื้น, มลพิษในบรรยากาศ และเกลือ เป็นต้น จากการตรวจสอบด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์พบว่า ปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการผุกร่อนของโบราณสถานนั้นเกิดขึ้นจากเกลือ และความชื้น โดยเกลือสามารถทำปฏิกิริยากับโบราณสถานได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเกลือที่ละลายน้ำได้ดี โดยจะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุที่มีรูพรุนแล้วสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัตถุ เมื่อใดที่มีความชื้นลดลงน้ำจะ ระเหยออกไปตรงผิวของวัตถุส่วนเกลือจะตกผลึกอยู่ในเนื้อวัตถุ นั้นๆ การตกผลึกจะเกิดมากตรงผิวของวัตถุที่มีอัตราการระเหยสูง เมื่อใดที่มีความชื้นสูงขึ้นเกลือจะดูดความชื้นแล้วกลายเป็นสารละลายอีก และจะตกผลึกเมื่อความชื้นลดลง เป็นเช่นนี้ซ้ำแล้วซ้ำเล่าตลอดเวลาผลึกเกลือจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนในที่สุดจะขยายขนาดดันให้ช่องว่างและรูพรุนภายในเนื้อวัตถุแตกออก โดยเกลือมีแหล่งที่มาจากเกลือที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อดินเอง เกลือที่มาจากน้ำใต้ดิน เกลือที่มีอยู่ในเนื้อวัตถุ และเกลือที่มาจากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะก๊าซมลพิษ ก๊าซที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการเสื่อมสภาพของศิลปโบราณวัตถุ ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นั่นคือเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เมื่อทำปฏิกิริยากับวัตถุ โดยเฉพาะที่มีสารประกอบคาร์บอเนตจะกลายเป็นเกลือซัลเฟต ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สำคัญมากในการเสื่อมสภาพของวัตถุ ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาตราบใดที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปะปนอยู่ในอากาศ และปฏิกิริยานี้จะทวีความรุนแรงในที่ที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปะปนอยู่มาก เช่นในเมืองที่มีการจราจรคับคั่ง หรือแม้ในอากาศที่บริสุทธิ์ก็มีก๊าซเหล่านี้แต่มีเพียงเล็กน้อย ปฏิกิริยาจึงยังคงเกิดอย่างช้าๆ ทีละน้อยๆ อย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไปวัตถุจะสึกกร่อน ปริมาณเกลือก็จะสูงขึ้น (จิราภรณ์ อรัณยะนาค, 2544)

เมื่อทำการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างกรดไนตริกในสภาวะก๊าซ หรือไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และผงแคลไซต์ (Calcite) ภายใต้ความดันต่ำนั้น พบว่ากรดไนตริกจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของแคลไซต์ได้ดีมาก และจะกลายเป็น เกลือ, ไลต์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้ปริมาณของผงแคลไซต์ (Calcite) ลดลง โดยประสิทธิภาพของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ศึกษาจากความเป็นไปได้ของการชนกันของก๊าซและแคลไซต์ เท่ากับ $(10 \pm 2) \times 10^{-2}$ (Fenter, Calos and Rossi, 1995)

ในประเทศตุรกี ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบและการกัดกร่อนโดยซัลเฟตไอออน ซึ่งมาจาก ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศ ที่มีต่อคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างผนังภายนอกของอาคารทั่วไป พบว่าอัตราการกัดกร่อนของผนังภายนอกอาคารนั้นมีสูงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพบว่าซัลเฟตของโซเดียม, ซัลเฟตของโพแทสเซียม, ซัลเฟตของแมกนีเซียม และซัลเฟตของแอมโมเนียม เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อซีเมนต์ Portland ที่มีความชื้น คอนกรีตเกิดการผุกร่อนในที่สุด ซึ่งเป็นสาเหตุที่สามารถอธิบายถึงการแตกหัก และรอยร้าวของผนังอาคารที่เกิดขึ้นนี้ได้ (Demirbas, Öztürk และ Karatas, 2001) และในปีต่อมา ได้มีการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และหินอ่อน โดยให้บริเวณพื้นผิวของหินอ่อนสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยตรง ที่ความเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะเวลา 540 ชั่วโมง ได้พบว่า ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในอากาศจะทำปฏิกิริยากับแคลไซต์ (CaCO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบภายในของ หินอ่อน จะได้ผลผลิตเป็น Calcium Sulphite Hemihydrate ($\text{CaSO}_3 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) และยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ดีกว่าแคลไซต์ ดังนั้นจึงถูกชะละลายออกจากหินอ่อนได้ง่าย ทำให้เป็นเหตุของการทำลายพื้นผิวและโครงสร้างของ หินอ่อนจนเกิดการกัดกร่อนนั่นเอง (Böke, Göktürk และ Saltik, 2002)

นอกจากนี้ จากการศึกษาวิจัยของ Sramek (อ้างถึงใน Levy, 1998) เกี่ยวกับผลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นกับหินปูนชนิดหนึ่งด้วยวิธี Infra-red Reflection Spectrography โดยการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งเขาสามารถสรุปขบวนการที่เกิดขึ้นต่างกัน 2 ขบวนการ ได้ดังนี้ ขบวนการแรก เกิดขึ้นบนผิวหินที่แห้ง โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกดูดซับที่ผิวและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น โดยมีออกไซด์ของโลหะทรานซิชันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซและของแข็ง และผลผลิตสุดท้ายเกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ขึ้น และขบวนการต่อมา คือ เกิดในสถานะที่ผิวของหินซึ่งมีแผ่นฟิล์มของน้ำปรากฏอยู่ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสถานะของเหลวของน้ำ, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ทั้งนี้โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ส่วนประกอบหลักของหินประเภทหินปูน หินอ่อน หรือในปูนปั้น และปูนฉาบ ได้เป็นแคลเซียมซัลไฟด์ หรือ ไบซัลไฟด์ (Calcium sulphite or Bisulphite) ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้อย่างรวดเร็ว โดยแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นนี้เอง สามารถหลุดร่อนออกจากเนื้อหินให้มีการสึกกร่อนเกิดขึ้น (Levy, 1998)

จากข้อมูลองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : US.EPA) กล่าวว่า การตกสะสมแห้งของสารประกอบซัลเฟอร์ ทำให้เกิดการสึกกร่อนของหินได้โดยการเปลี่ยนรูปเป็นยิปซั่มบนผิวของหิน ซึ่งยิปซั่มจะมีลักษณะเป็นสีขาว หนา

เป็นองค์ประกอบหลักของแคลเซียมซิลิเกตไดไฮดรต ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือแคลไซต์ที่มีอยู่ในหินกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์และความชื้นในบรรยากาศ ซึ่งยิปซัมสามารถละลาย น้ำได้ดีกว่าแคลไซต์ และจะเกิดขึ้นบนหินปูน หินทราย และหินอ่อนเมื่อได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากการทดลองเพื่อศึกษา ถึงผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และอนุภาคฝุ่นในบรรยากาศที่มี ต่อหินชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อหินเหล่านี้มาอยู่ในสภาวะของบรรยากาศที่มีออกไซด์ของซัลเฟอร์ และ ออกไซด์ของไนโตรเจน รวมทั้งอนุภาคฝุ่น เป็นองค์ประกอบ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีส่วนของเนื้อหิน สึกกร่อนหายไปทดลองกับหินปูน (Limestone) โดยจัดให้อยู่ในสภาวะที่ได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1.4-2.4 ส่วนในพันล้านส่วน (3.7-53.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ 4.1-14.1 ส่วนในพันล้านส่วน ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ 2.4-17.4 ส่วนในพันล้านส่วน (4.5-32.7 ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร) และโอโซน 10.1-25.6 ส่วนในพันล้านส่วน (19.8-50.2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เป็นเวลา 70 ถึง 1,065 วัน พบว่าน้ำหนักของหินปูนจะลดลงเมื่อปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการตรวจวัดส่วนที่หายไป เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบว่ามีความประมาณ 24 ไมโครเมตรต่อปี แต่จะลดลงบ้างเล็กน้อยถ้าเพิ่มระยะเวลาให้นานขึ้น และเมื่อทำการทดลองโดยมาใช้ หินอ่อนประเภท Marble sandstone โดยการ วิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะฝนตก ซึ่งพบว่า การสึกกร่อนที่เกิดขึ้นทำให้เนื้อหินอ่อนหายไปประมาณ 15-30 ไมโครเมตรต่อปี และถ้าทำการทดลอง โดยใช้หินปูนประเภท Portland limestone Massangis Jaune Roche4 limestone และ White Mansfield dolomitic โดยการให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ ที่ 10 ส่วนในล้านส่วน ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีก๊าซออกซิเจน และในสภาวะที่แห้งและเปียก เป็นเวลา 30 วัน พบว่าในสภาวะที่ขาดความชื้นสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เล็กน้อย โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูก ออกซิไดส์เป็นซัลเฟตในสภาวะที่มีความชื้น และจะเกิดผลมากขึ้นด้วยเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจน นอกจากนี้เมื่อใช้หินอ่อนประเภท Carara marble, Travertine และ Tranistone ในการทดลองโดยให้ มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3 ส่วนในล้านส่วน และความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 150 วัน โดยเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นระหว่างการได้รับก๊าซจากขบวนการเผาไหม้ เนื่องจากมีอนุภาคของโลหะ เป็นองค์ประกอบ (US.EPA, 1999)

นอกจากจะมีการสึกกร่อนที่ผิวของหินแล้ว ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังสามารถซึมผ่านลงไป ในเนื้อหินได้ตามรอยแตก และตามรูพรุนของเนื้อหิน เมื่อมีน้ำเป็นตัวสนับสนุนก็จะเกิดปฏิกิริยากับ แคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้การสึกกร่อนได้เช่นกัน จากการทดลองของ Perry และ Duffy (1997) พบว่าแม้จะอยู่ในสภาวะที่ไม่มีฝนตกหรือความชื้นบนผิวของหินแต่ปฏิกิริยาการดูดซับ และออกซิเดชัน ก็สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งเขาได้ทำการทดลองโดยใช้หินที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณเท่ากัน และ

ให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 600 ส่วนในล้านส่วน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเป็นศูนย์ การดูดซับจะถูกรบกวนหลังจากเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง ในขณะที่ระดับของความชื้นสัมพัทธ์อื่น การดูดซับจะเกิดขึ้นทั้งหมด โดยอัตราการเกิดขึ้นกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการทดลอง และแม้ว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสึกกร่อนได้ แต่ในการทดลองของพวกเขา ก็พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสามารถลดปฏิกิริยาการทำลายที่ผิวของหินได้ โดยอัตราการดูดซับ และปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีน้อยกว่าวัสดุตัวอย่างที่ไม่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (Perry and Duffy, 1997)

จากการศึกษาของ Junge และ Ryan (อ้างถึงใน Skiotis, Paradellis and Katselis, 1979) พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันจะไม่เกิดขึ้นสภาวะไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยา จะหยุดลงเมื่อผ่านไป ซึ่งอาจเป็นเพราะค่าพีเอช ในสารละลายลดลง เขาได้ศึกษาถึงระบบของ $\text{SO}_2\text{-NH}_3$ ในน้ำ และพบว่าแอมโมเนียจะป้องกันการหยุดการรวมตัวของซัลเฟตจากการทำให้กรดซัลฟูริกมีสภาพเป็นกลาง ซึ่งในความจริงแล้วในบรรยากาศยังมีสารปรับเสถียรอื่นอีก เช่น Calcitic และ Dolomitic ในอนุภาคฝุ่น โดยสารเหล่านี้จะทำหน้าที่เหมือนกับแอมโมเนียในการป้องกันการลดค่าของพีเอช และการละลายได้ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสารละลาย และในสภาวะอุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในที่มืด จะเกิดได้ช้ามาก แต่จะเกิดได้ดีในสภาวะที่มีแสงแดด ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอล และมีตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น นอกจากปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอลจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากขึ้นแล้ว บรรยากาศยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ที่มีอยู่ในอนุภาคฝุ่นอีกด้วย ได้แก่ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) เป็นต้น (Skiotis, Paradellis and Katselis, 1979)

จากการศึกษาและงานวิจัยต่างๆ ดังได้กล่าวมาข้างต้นนี้ ทำให้ทราบว่าอัตราการดูดซับ และปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่เกิดขึ้นบนส่วนต่างๆ ของวัตถุ หรือที่ผิวของรูปปั้นนั้น จะมีอัตราการเกิดที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ด้วยกัน เช่น ความเข้มข้นของคุณสมบัติ และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความเป็นกรดต่าง และคุณสมบัติของวัสดุเอง

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาปัญหาเบื้องต้น

3.1.1 ศึกษาสภาพของปัญหา

ทำการรวบรวมข้อมูล ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ เพื่อทราบถึงสภาพพื้นฐานของปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น

3.1.2 ศึกษาพื้นที่งานอยุธยาจรดไกล

สำรวจโครงสร้างและกิจกรรมของงานอยุธยาจรดไกล การจัดตั้งอุปกรณ์การแสดงผลต่างๆ เนื่องจากจังหวัดพระนครศรีอยุธยาจะมีการจัดงาน แสง เสียง ณ บริเวณโบราณสถานของเกาะเมืองเป็นประจำทุกปี ทั้งนี้จะมีการแสดง แสง เสียง ตลอดจนมีการจุดดอกไม้ไฟ เพื่อประกอบการแสดง และเพื่อเป็นการเฉลิมฉลอง ดังนั้นจึงได้ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อให้ทราบถึงปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากงานดังกล่าว เพื่อการศึกษาปัญหาต่อไป

3.1.3 วิธีการเก็บตัวอย่าง

1) บริเวณจุดติดตั้งเครื่องมือเก็บตัวอย่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ทำการศึกษาพื้นที่ศึกษาถึงจุดการตั้งกิจกรรมการแสดงผล และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ประกอบการแสดง เพื่อให้ทราบว่าน่าจะมีการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในจุดใด และศึกษาถึงอิทธิพลของลมมรสุม ตลอดจนตำแหน่งของตัวผู้รับ (receptor) เพื่อใช้ในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องมือตรวจวัดอากาศ

2) วิธีการเก็บตัวอย่าง

โดยทำการตรวจวัดปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นจากการจัดงานอยุธยาจรดไกล ในสถานที่จัดงานบริเวณเกาะเมือง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ด้วยวิธีพาราโรซานิลิน (Pararosaniline method) ซึ่งเป็นวิธีตรวจวัดตามมาตรฐานการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ (สามารถดูขั้นตอนและวิธีการอย่างละเอียดที่ ภาคผนวก ก)

(1) เครื่องมือและอุปกรณ์ การเก็บตัวอย่าง

(1.1) Sample Inlet

(1.2) Impinger

(1.3) Silica gel

(1.4) Rotameter และวาล์วสำหรับควบคุมอัตราการไหลของอากาศ
ให้ อยู่ในช่วง 180-220 มิลลิลิตร/นาที

(1.5) Air pump

(1.6) กรวยพลาสติก

(2) สารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง ได้แก่

(2.1) น้ำกลั่น ใช้ น้ำกลั่นที่ทำกรต้มให้เดือด และเย็นแล้ว และไม่มี
สารออกซิเดนท์

(2.2) พรอทคลอไรด์ (Mercury Chloride, $HgCl_2$)

(2.3) อีดีทีเอ (Ethylene Diamine Tetra Acetic Acid, EDTA)

(2.4) โปตัสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride, KCl)

3) การเตรียมสารละลายสำหรับการเก็บตัวอย่าง

สำหรับสารละลายดูดกลืนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Absorbing Solution for Sulfur dioxide) หรือ TCM Absorbing solution ใช้ 0.04 โมลาร์ TCM เตรียมโดย ละลาย พรอทคลอไรด์ ($HgCl_2$) 10.86 กรัม อีดีทีเอ (EDTA) 0.66 กรัม และ โปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) 6.0 กรัม ในน้ำกลั่น เจือจางจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

4) ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง

(1) ดึงสารละลายดูดกลืน (Absorbing Solution) 0.04 โมลาร์ ของ TCM จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงในหลอดตรวจจับ พร้อมทั้งทำการหุ้มหลอดตรวจจับ ด้วยแผ่น อลูมิเนียม เพื่อป้องกันแสงและป้องกันการสลายตัวของ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และในขณะที่เก็บตัวอย่างจะต้อง ควบคุมอุณหภูมิโดยมีส่วนทำความเย็น (Cooling Unit)

(2) ประกอบชุดเครื่องมือให้พร้อม (ดังแสดงในรูปที่ 3.1)

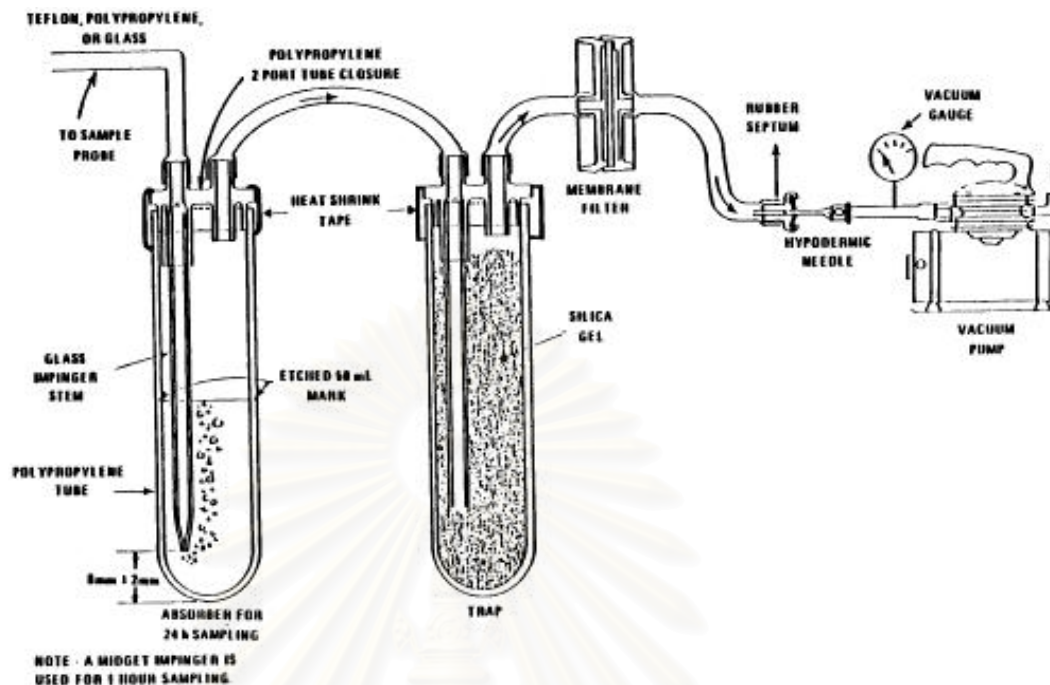
(3) เปิดปั๊มดูดอากาศ และปรับอัตราการไหลอากาศให้อยู่ในช่วง 180 - 220 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยใช้วาล์วเป็นตัวควบคุมอัตราการไหล

(4) เปิดปั๊มติดต่อกันนาน 24 ชั่วโมง บันทึกเวลาที่เก็บเป็นนาที

(5) ครบ 24 ชั่วโมง วัดค่าของอัตราการไหลของอากาศหลังการเก็บตัวอย่าง

(6) ปิดหลอดให้แน่น ปิดฉลาก และแช่หลอดตรวจจับในถังน้ำแข็ง เพื่อรอการ

วิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.1 ชุดเก็บตัวอย่างอากาศ ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง
ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2540)

3.1.4 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.1.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ การเก็บตัวอย่าง

- 1) Spectrophotometer ตั้งค่าความยาวคลื่นที่ 548 นาโนเมตร โดยใช้เซลล์ขนาด 1 เซนติเมตร
- 2) เครื่องซังไฟฟ้าอย่างละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3) Volumetric Flask ขนาด 25, 50, 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 4) Pipette ขนาดความจุ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิลิตร
- 5) Beaker ขนาด 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 6) Erlenmeyer Flask ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 7) ถ้วยซังสารเคมี
- 8) แท่งแก้วคนสารละลาย

3.1.4.2 สารเคมีและการเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์

1) สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์

- (1) กรดซัลฟามิก (Sulfamic Acid, H_3NO_3S)
- (2) สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde, HCHO)
- (3) สารละลายพาราโรซานิลีนคลอไรด์ (Pararosaniline Chloride 0.2% in 1 M Hydrochloric acid, $C_{19}H_{18}ClN_3$)

2) สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน

- (1) ไอโอดีน (Iodine, I_2)
- (2) สารละลายน้ำแป้ง (Starch Soluble, $(C_6H_{10}O_5)_n$)
- (3) โซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate, $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$)
- (4) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate, Na_2CO_3)
- (5) โซเดียมไอโอเดต (Sodium Iodate, $NaIO_3$)
- (6) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide, KI)
- (7) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)
- (8) ปรอทไอโอไดด์ (HgI_2)
- (9) โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ (Sodium Metabisulfite, $Na_2S_2O_5$) หรือ โซเดียมซัลไฟท์ (Sodium Sulfite, Na_2SO_3)

3) การเตรียมสารละลายสำหรับการตรวจวิเคราะห์

- (1) สารละลายกรดซัลฟามิก ความเข้มข้น 0.6 เปอร์เซ็นต์
ละลายกรดซัลฟามิก 0.6 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร (สารละลายนี้ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์)
- (2) สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์
สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ที่ความเข้มข้น 36 – 38 เปอร์เซ็นต์ มา 5 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร (สารละลายนี้ ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้ง)

(3) สารละลายสต็อกของไอโอดีน ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ชั่งไอโอดีน 12.7 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติม
โปตัสเซียมไอโอไดด์ 40 กรัม และน้ำกลั่นประมาณ 25 มิลลิลิตร คนจนสารทุกตัวละลายหมด
แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

(4) สารละลายอินดิเคเตอร์ของแป้ง (ชนิด Soluble Starch)

ละลายแป้ง 0.4 กรัม และปรอทไอโอไดด์ 0.002 กรัม ใน
น้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย แล้วค่อยๆ เติมน้ำกลั่นที่ร้อนลงไปจนได้ปริมาตร ประมาณ 200 มิลลิลิตร
นำไปต้มต่อจนสารที่ได้ละลายหมด ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนเก็บใส่ขวดแก้ว แล้วทำการปิดจุกอย่างดี

(5) สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล

นำสารละลายสต็อกไอโอดีน ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล 50 มิลลิลิตร
แล้วทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

(6) สารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 25.0 กรัม ในน้ำกลั่นที่เพิ่งต้มใหม่ และ
ทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว 1,000 มิลลิลิตร แล้วเติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 กรัม ลงไป ตั้งทิ้งไว้ 1 วัน ก่อนตรวจ
เช็คค่าความเข้มข้นที่แท้จริง โดยวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นที่แท้จริง ของสารละลายสต็อกของ
โซเดียมไฮโอซัลเฟต ซึ่งทำได้ดังนี้

(6.1) ชั่งโปตัสเซียมไอโอเดต ที่ทำการอบให้แห้งที่ 180
องศาเซลเซียส นาน 1 – 2 ชั่วโมง จำนวน 1.5 กรัม (ซึ่งอย่างละเอียดถึงทศนิยม ตำแหน่งที่ 4) แล้ว
ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

(6.2) ปิเปตสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต จำนวน 50
มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติม โปตัสเซียมไอโอไดด์ 2.0 กรัม และ
ไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ

(6.3) ปิดจุกและตั้งทิ้งไว้ 5 นาที

(6.4) นำสารละลายที่ได้ผสมข้างต้นนี้ มาทำการไตเตรทกับ
สารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟต จนได้เป็นสีเหลืองจาง เติมน้ำแป้งลงไป 5.0 มิลลิลิตร จะได้
สารละลายสีน้ำเงิน ทำการไตเตรท ต่อจนสีน้ำเงินหายไป

(6.5) คำนวณหาความเข้มข้นที่แท้จริงของสารละลายสต็อก
โซเดียมไฮโอซัลเฟต โดยใช้สมการ

$$N = \frac{W}{V} \times 2.80 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นเป็น นอร์มัล ของสารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ต้องการทราบ
 V = ปริมาตรเป็น มิลลิลิตร ของสารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟตทั้งหมดที่ใช้ไตเตรท
 W = น้ำหนักเป็น กรัม ของโปตัสเซียมไอโอเดตที่ใช้เตรียมสารละลาย
 2.80 = เป็นตัวเลขที่ได้จาก $\frac{10^3 \times 0.1}{35.67}$

(7) สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล
 นำสารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟต จำนวน 100 มิลลิลิตร มา
 เจือจางด้วยน้ำกลั่นที่เพิ่งต้มใหม่และทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว จนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

(8) สารละลายซัลไฟท์
 ละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.30 กรัม หรือ โซเดียมซัลไฟท์ 0.40
 กรัม ในน้ำกลั่นที่ต้มใหม่และเย็นแล้ว จำนวน 500 มิลลิลิตร โดยที่สารละลายนี้จะมีปริมาณของ
 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในช่วง 320 – 400 ไมโครกรัม/ มิลลิลิตร

(9) สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม (Sulfite - TCM)
 ปิเปตสารละลายซัลไฟท์ จำนวน 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับ
 ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายทีซีเอ็ม 0.04 โมลาร์ จนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
 แล้วตรวจเช็คปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ด้วยวิธีการไตเตรทย้อนกลับ
 (Back Titration)

การคำนวณ หาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสารละลายซัลไฟท์ -
 ทีซีเอ็ม โดยวิธีการไตเตรทย้อนกลับ

(9.1) ปิเปตสารละลายไอโอดีน เข้มข้น 0.01 นอร์มัล ใส่
 ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร 2 ใบ ใบละ 50 มิลลิลิตร

(9.2) ขวดใบที่ 1 (A) เติมน้ำกลั่นลงไป 25 มิลลิลิตร ขวด
 ใบที่ 2 (B) เติม สารละลายซัลไฟท์ ลงไป 25 มิลลิลิตร

(9.3) ปิดจุกขวดทั้งสอง แล้วตั้งทิ้งไว้ 5 นาที

(9.4) ไตเตรทสารละลายทั้ง A และ B ด้วยสารละลาย
 โซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.01 นอร์มัล จนได้สีเหลืองจาง เติมน้ำแบ่ง จำนวน 5.0 มิลลิลิตร ลงในขวดทั้ง
 สอง จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ทำการไตเตรทต่อจนได้สารละลายที่ไม่มีสี

(9.5) ทำการคำนวณ หาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสารละลาย ซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม โดยใช้สมการ 3.2

$$\text{ไมโครกรัม SO}_2 / \text{มิลลิลิตร. ในสารละลายซัลไฟท์-ทีซีเอ็ม} = \frac{(A - B)(N)(32,000) \times 0.02}{25} \dots\dots\dots (3.2)$$

- เมื่อ
- A = ปริมาตรเป็น มิลลิลิตร ของ 0.01 นอร์มัล โซเดียมไฮโอซัลเฟต ที่ใช้ในการไตเตรทขวด A
- B = ปริมาตรเป็น มิลลิลิตร ของ 0.01 นอร์มัล โซเดียมไฮโอซัลเฟต ที่ใช้ในการไตเตรทขวด B
- N = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ มีค่า = 0.01 นอร์มัล
- 32,000 = มิลลิกรัมสมมูล (Milligram equivalent) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- 0.02 = อัตราส่วนของสารละลายซัลไฟท์ ในสารละลายซัลไฟท์- ทีซีเอ็ม
- 25 = ปริมาตร เป็น มิลลิลิตร ของสารละลายซัลไฟท์ที่ใส่อยู่ในขวด B

สารละลายซัลไฟท์-ทีซีเอ็ม เก็บไว้ได้นาน 30 วัน ที่ 5 องศาเซลเซียส แต่ถ้าไม่ใส่ตู้เย็น ที่ 5 องศาเซลเซียส ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้

(10) สารละลายพาราโรซานิลีน

นำ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ของสารละลายสำเร็จรูปของพาราโรซานิลีน ใน 1.0 โมลาร์ ของกรดเกลือ จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมกรด ฟอสฟอริก ความเข้มข้น 3 โมลาร์ จำนวน 25 มิลลิลิตร ลงไป แล้วจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร สารละลายพาราโรซานิลีนที่เตรียมได้นี้จะมีอายุการใช้งานนาน 9 เดือน

3.1.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สารตัวอย่าง

- 1) ถ่ายตัวอย่างที่เก็บใส่ขวดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร ล้างหลอดตัวจับด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 2) ตั้งทิ้งไว้ 20 นาที เพื่อให้ไอโซทสลายตัวไป
- 3) ปิเปตสารละลายตัวอย่าง จำนวน 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วเติม TCM ลงไป 5 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้ เข้ากัน
- 4) เติม 0.6 เปอร์เซ็นต์ ของกรดซัลฟามิก ลงไปจำนวน 1 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้ไนโตรทสลายตัว

- 5) เติม 0.2 เปอร์เซ็นต์ ของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ จำนวน 2 มิลลิลิตร
- 6) เติมสารละลาย พาราโรซานีน 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที
- 7) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ 25 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 30 – 60 นาที
- 8) วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องเทียบสี ที่ความยาวคลื่น 548 นาโนเมตร

บันทึก ค่าที่อ่านได้ (A)

9) เตรียม Blank โดยใช้ TCM จำนวน 10 มิลลิลิตร (แทนสารละลาย ตัวอย่าง) แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง และทำการบันทึก ค่าการดูดกลืนแสง (A_0)

3.1.4.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Standard Calibration Curve)

1) ปิเปตสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ลงในขวดปรับปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร ในปริมาตรต่างๆ และ เติมสารละลาย 0.04 โมลาร์ TCM ลงไปในขวด แต่ละใบให้ปริมาตรรวมของแต่ละใบนั้นเท่ากับ 10 มิลลิลิตร ดังนั้นจะได้การเตรียม สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ตามตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ปริมาตรสารละลายซัลไฟท์-ทีซีเอ็ม และ 0.04 M TCM ที่ใช้เตรียมสารละลายมาตรฐาน

ลำดับที่	ปริมาตรสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม (มิลลิลิตร)	ปริมาตรสารละลาย 0.04 โมลาร์ TCM (มิลลิลิตร)
ขวดใบที่ 1	0.0	10.0
ขวดใบที่ 2	0.5	9.5
ขวดใบที่ 3	1.0	9.0
ขวดใบที่ 4	2.0	8.0
ขวดใบที่ 5	3.0	7.0
ขวดใบที่ 6	4.0	6.0

จากนั้นนำขวดใบที่ 1 ถึง 6 นี้ มาเติมสารละลายเหมือนกับการวิเคราะห์สารตัวอย่างทุกขั้นตอน

2) นำค่าที่ได้มาทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ โดยการพล็อตกราฟมาตรฐาน ให้แกน X = ความเข้มข้นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในหน่วยไมโครกรัม และ ให้แกน Y = ค่าการดูดกลืนแสง

โดยความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หาได้จากสมการ 3.3

$$\text{ไมโครกรัม SO}_2 = \left[\begin{array}{c} \text{ไมโครกรัม SO}_2 / \text{มิลลิลิตร} \\ \text{ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{มิลลิลิตรของสารละลาย} \\ \text{ซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ที่เติมลงไป} \end{array} \right] \dots(3.3)$$

3.1.4.5 การคำนวณหาปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(1) คำนวณหาปริมาตรอากาศที่เก็บได้ จากสมการ 3.4

$$V = \frac{F_1 + F_2}{2} \times t_s \times 10^{-3} \dots\dots\dots (3.4)$$

- เมื่อ V = ปริมาตรอากาศ (ลิตร) ทั้งหมดที่เก็บตัวอย่าง
 F_1 และ F_2 = ค่าอัตราการไหลของอากาศก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง (มิลลิลิตร/นาที)
 t_s = ระยะเวลา (นาที) ที่เก็บตัวอย่าง
 10^{-3} = ตัวเลขที่ใช้เปลี่ยนหน่วยจาก มิลลิลิตร เป็น ลิตร

(2) เปลี่ยนปริมาตรอากาศที่เก็บตัวอย่างเป็นปริมาตรที่ STP จากสมการ 3.5

$$V_s = \frac{PV}{(t - 273)K} \times \frac{298 \text{ K}}{1,013.25} \dots\dots\dots (3.5)$$

- โดยที่ V_s = ปริมาตรอากาศ (ลิตร) ที่ STP (25 องศาเซลเซียส, 1,013.25 มิลลิบาร์)
 P = ความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์, mb) ขณะทำการเก็บตัวอย่าง
 V = ปริมาตรอากาศที่เก็บทั้งหมด (ลิตร)
 t = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ขณะเก็บตัวอย่าง

(3) คำนวณหาความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในตัวอย่าง ในหน่วย

ไมโครกรัม SO_2 /ลูกบาศก์เมตร

$$\text{ไมโครกรัม SO}_2 / \text{ลูกบาศก์เมตร} = \frac{(A - A_o)(10^3)(B_s)}{V_s} \times D \dots\dots\dots (3.6)$$

โดยที่ A	=	ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่วัดได้
A_0	=	ค่าการดูดกลืนแสงของ Blank ที่วัดได้
B_s	=	ส่วนกลับของ Slope ของกราฟมาตรฐาน = $\left[\frac{1}{slope} \right]$
D	=	ค่า Dilution Factor (D = 1 สำหรับตัวอย่างที่เก็บ 30 – 60 นาที, D = 10 สำหรับตัวอย่างที่เก็บ 24 ชั่วโมง)
10^3	=	ตัวเลขที่ใช้เปลี่ยนหน่วยจาก ต่อลิตร เป็น ต่อลูกบาศก์เมตร

(4) คำนวณหาความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในหน่วย พีพีเอ็ม (ppm)

หรือส่วนในล้านส่วน จากสมการ 3.7

$$\text{พีพีเอ็ม SO}_2 = (\text{ไมโครกรัม SO}_2 / \text{ลูกบาศก์เมตร}) \times (3.82 \times 10^{-4}) \dots\dots\dots(3.7)$$

3.2 การพัฒนาวิธีการ

ในการวิจัยส่วนนี้ได้ทำการพัฒนาวิธีการขึ้นมา เนื่องจากไม่มีเครื่องมือซึ่งสามารถนำมาใช้ศึกษาการกักก่อนของวัสดุที่เกิดจากการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จึงมีความจำเป็นต้องทำการพัฒนาชุดเครื่องมือขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษาการกักก่อนของวัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน โดยทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

3.2.1 การเตรียมการ

ในขั้นตอนของการเตรียมการ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ศึกษาองค์ประกอบของเครื่องมือที่ทำการพัฒนา โดยศึกษาถึงความสามารถในแต่ละองค์ประกอบ ถึงวิธีการ หรือเครื่องมือ ที่สามารถนำมาพัฒนาได้ ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ นี้ ได้แก่

- (1) หน่วยผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- (2) หน่วยตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- (3) ห้องทดสอบ
- (4) เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการกักก่อน

2) ติดต่อหน่วยงานต่างๆ เพื่อขอความร่วมมือในการขอใช้เครื่องมือที่สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาเครื่องมือ

3) สรุปหลักการของเครื่องมือ

โดยดูจากความเป็นไปได้จากการศึกษาองค์ประกอบจากข้อ 1) และจากวิธีการ หรือ เครื่องมือ ที่มีหรือติดต่อขอใช้ได้ในข้อ 2)

3.2.2 การทดสอบ

เป็นการทดสอบเครื่องมือที่ทำการพัฒนา เช่น คุณภูมิ, ความเข้มข้น และความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อใช้ในการศึกษาการกักกรองที่ได้จากข้อ 3.2.1 ที่ทำการสรุปหลักการ และวิธีการแล้ว โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

(1) วัสดุตัวอย่าง

วัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือ ได้แก่ อีฐูปัจจุบัน โดยนำมาปรับแต่งขนาด ให้มีขนาดประมาณ $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร แล้วทำการจัดเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง และเป็นวัสดุอ้างอิง ต่อไป

(2) วัสดุชุดเครื่องมือ

(2.1) กระบอกฉีดยา (syringe)

(2.2) ขวดแก้วผลิตก๊าซ

(2.3) กระบอกฉีดยาก๊าซ (gas syringe)

(2.4) ห้องทดสอบ (test chamber)

(2.5) เครื่อง MultiRAE IR (Multigas Monitor)

(2.6) เครื่อง Micrologger

(2.7) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

(3) สารเคมี

(3.1) กรดไฮโดรคลอริก (6M HCl)

(3.2) โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3)

2) วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบ มีดังต่อไปนี้

(1) นำวัสดุตัวอย่างที่เตรียมไว้ ซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) แล้ววางวัสดุตัวอย่างลงในห้องทดสอบ แล้วทำการปิดฝาให้สนิท ทำการตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้น ทั้งภายนอกและภายในห้องทดสอบ โดยเครื่อง Micrologger

(2) เตรียมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยใส่โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3) 1.7 กรัม ลงในขวดผลิตก๊าซ ปิดจุกเซปตัม (septum) แล้วฉีดกรดไฮโดรคลอริก (6M) 5 มิลลิลิตร ลงไป จะสังเกตเห็นฟองก๊าซของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดขึ้นภายในขวด

(3) นำกระบอกฉีดก๊าซดูดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากขวดผลิตก๊าซในข้อ 2) แล้วฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ลงไปในห้องทดสอบ จำนวน 0.1 มิลลิลิตร (จากสมการ 3.8) เพื่อให้ได้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 50 ส่วนในล้านส่วน

$$\text{ปริมาณ SO}_2 \text{ (มิลลิลิตร)} = \frac{\text{ความเข้มข้นก๊าซ SO}_2 \text{ (พีพีเอ็ม)} \times \text{ปริมาตรห้องทดสอบ (มิลลิลิตร)} \dots(3.8)}{1,000,000}$$

(4) ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้ ภายในห้องทดสอบ โดยเครื่อง MultiRAE

(5) หลังจากครบ 2 สัปดาห์แล้วเปิดฝารoom ห้องทดสอบ แล้วนำวัสดุตัวอย่างมาทำการศึกษาว่ามีการกัดกร่อนที่สามารถสังเกตได้เกิดขึ้นหรือไม่ โดยการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) มาเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ชั่งไว้ก่อนทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

3.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ ดังนี้

1) ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ

ทำการทดสอบเครื่องมือที่พัฒนา โดยดูค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ โดยเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ที่ตรวจวัดได้ทั้งภายในและภายนอกห้องทดสอบ โดยใช้วิธีการทางสถิติ

2) ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ทำการทดสอบค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นในห้องทดสอบ กับค่าที่ได้จากการคำนวณ ว่าสามารถเชื่อถือได้หรือไม่ โดยใช้วิธีการทางสถิติ

3) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาถึงการเกิดการกัดกร่อน ในชั้นที่สามารถทำการวิเคราะห์ต่อไปได้หรือไม่ โดยดูจากการหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (%Weight Loss) ของวัสดุตัวอย่าง

3.3 การศึกษาการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน

ในงานวิจัยส่วนนี้ เป็นส่วนที่ศึกษาถึงการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ของวัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อีฐเก่า, อีฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน ที่ทำการสัมผัสกับก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยชุดเครื่องมือที่ได้ทำการพัฒนามาแล้วข้างต้น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

1) วัสดุตัวอย่าง

ทำการเตรียมวัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อีฐและปูนปั้น ดังต่อไปนี้

(1) อีฐ

นำวัสดุตัวอย่างอีฐ ซึ่งได้แก่ อีฐเก่า และอีฐปัจจุบัน มาปรับแต่งขนาดให้มีขนาดประมาณ 2.5 X 2.5 X 2.5 เซนติเมตร แล้วทำการจัดเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง และเป็นวัสดุอ้างอิง

(2) ปูนปั้น

นำวัสดุตัวอย่าง ได้แก่ ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน มาปรับแต่งขนาดให้มีขนาดประมาณ 2.5 X 2.5 X 2.5 เซนติเมตร แล้วทำการจัดเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้ในการทดลอง และเป็นวัสดุอ้างอิงต่อไป

2) อุปกรณ์ ของชุดเครื่องมือซึ่งได้ทำการพัฒนาขึ้นมาเพื่อการศึกษาการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน มีดังต่อไปนี้

(1) อุปกรณ์

(1.1) กระบอกฉีดยา (syringe)

(1.2) ขวดแก้วผลิตก๊าซ

(1.3) กระบอกฉีดยาก๊าซ (gas syringe)

(1.4) ห้องทดสอบ (testing chamber)

(1.5) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

(1.6) เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

(1.7) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

(2) สารเคมี

(2.1) กรดไฮโดรคลอริก (6M HCl)

(2.2) โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO₃)

3.3.2 วิธีการศึกษาการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน

1) ศึกษาคุณสมบัติของอิฐและปูนปั้น

(1) ความหนาแน่น

นำวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน มาทำการหามวล (หน่วยเป็นกรัม) โดยการชั่งน้ำหนัก และทำการหาปริมาตร (หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยการแทนที่น้ำด้วยกระบอกยูเรกา แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ 3.9 เพื่อทำการหาความหนาแน่น

$$D = \frac{M}{V} \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

เมื่อ D = ความหนาแน่น, กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

M = มวล (กรัม)

V = ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

(2) ศึกษาองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่าง

นำวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน ทำการศึกษาองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

2) การทดลอง การกักกรอง และอัตราการกักกรอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาการกักกรอง และอัตราการกักกรอง สามารถทำการทดลองโดยวิธีการดังนี้

(1) นำวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อีฐเก่า, อีฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน ที่ได้ทำการเตรียมไว้แล้ว มาทำการชั่งน้ำหนัก ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) แล้ววางวัสดุตัวอย่างเหล่านี้ ลงในห้องทดสอบ ทั้ง 5 อัน แล้วทำการปิดฝาให้สนิท โดยวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดจะทำการทดลองเป็นเวลา 10 สัปดาห์ โดยตัวแทนของแต่ละสัปดาห์จะใช้ชนิดละ 3 ตัวอย่าง (หรือ 3 ชั้น)

(2) เตรียมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยใส่โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3) 1.7 กรัม ลงใน ขวดผลิตก๊าซ ปิดจุกเซปตัม แล้วฉีดกรดไฮโดรคลอริก (6M) 5 มิลลิลิตร ลงไป จะสังเกตเห็นฟองก๊าซของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดขึ้นภายในขวด

(3) นำกระบอกดูดก๊าซดูดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จากขวดผลิตก๊าซในข้อ 2) แล้วฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ลงไปในห้องทดสอบ โดยปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่จะทำการฉีดลงไปในห้องทดสอบแต่ละห้องนั้น เป็นไปตามที่ได้แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งวิธีการคำนวณหาปริมาณ SO_2 มาจากสมการ 3.9

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ฉีดเข้าห้องทดสอบ เพื่อให้ได้ความเข้มข้นต่างๆ

ห้องทดสอบ	ความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 ที่ต้องการ (พีพีเอ็ม)	ปริมาณ SO_2 ที่ฉีดเข้าห้องทดสอบ (มิลลิลิตร)
1	50	0.1
2	100	0.2
3	200	0.4
4	400	0.8
5	800	1.6

หมายเหตุ : ปริมาตรของห้องทดสอบเท่ากับ 2,000 มิลลิลิตร

(4) หลังจากครบ 1 สัปดาห์ ให้เปิดฝาท้องทดสอบ แล้วนำวัสดุตัวอย่างของ สัปดาห์ที่ 1 (ดังตารางที่ 3.3) ออกมาทำการศึกษากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป และทำเช่นนี้เรื่อยไปจนครบ 10 สัปดาห์ นั่นคือเริ่มทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2)

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการจัดเก็บวัสดุตัวอย่างจากห้องทดสอบ

ห้องทดสอบ	ความเข้มข้น (ppm)	สัปดาห์										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	50	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	200	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	400	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
5	800	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

หมายเหตุ * นำอิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน ออกมาจากห้องทดสอบ ชนิดละ 3 ชิ้น

3.3.3 การวิเคราะห์

นำวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ที่ได้จากการทดลอง และทำการเก็บในแต่ละสัปดาห์มาทำการวิเคราะห์ ดังนี้

1) การวิเคราะห์การกัดกร่อน มีด้วยกัน 3 วิธี ดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบลักษณะ ภายนอกด้วยตา

เป็นการตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนภายนอก ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ทั้งนี้ ได้ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลง หรือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล

(2) การตรวจสอบโครงสร้างภายใน

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการศึกษาลักษณะการกัดกร่อนของโครงสร้างภายในวัสดุตัวอย่าง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ศึกษาเป็นของ JEOL รุ่น JSM-5400 ซึ่งศึกษาด้วยกำลังขยาย 1000 เท่า



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 3.2 Scanning Electron Microscope ของ JEOL รุ่น JSM-5400

(3) ศึกษาองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่าง

ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) รุ่น D8 Advance ศึกษาองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่าง ทำให้สามารถทราบได้ว่ามีองค์ประกอบใดเพิ่มขึ้น มา หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากที่วัสดุตัวอย่างได้ทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว



รูปที่ 3.3 X-ray diffraction (XRD) รุ่น D8 Advance

2) อัตราการกัดกร่อน

(1) การชั่งน้ำหนัก หาน้ำหนักที่หายไป (weight loss)

เป็นการศึกษาอัตราการกัดกร่อน โดยดูจากเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป (% Weight Loss) ซึ่งใช้เครื่องชั่งอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ของ Sartorius รุ่น BA210S



รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งละเอียด ของ Sartorius รุ่น BA210S

(2) นำผลการทดลองที่ได้ นั่นคือเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัที่หายไป มาวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (mean), ค่าสถิติทดสอบ T-Test, การวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์ (Regression Analysis and Correlation)

(3) คำนวณหาสมการอัตราการกัดกร่อน

3.4 การประยุกต์ใช้สมการอัตราการกัดกร่อน

โดยการนำสมการอัตราการกัดกร่อนที่ได้ มาทำการพยากรณ์คาดการณ์ถึงการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต โดยประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่ทำกรตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในงานอุตสาหกรรมทั่วโลก และข้อมูลการพยากรณ์ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ISCST3 (Industrial Source Complex Short Term) โดยแปลผลออกมาดังนี้

- 1) เปอร์เซนต์การกัดกร่อน
- 2) ความลึกผิวหน้าวัสดุที่ถูกทำลาย

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลักษณะพื้นที่ศึกษา

4.1.1 สภาพปัญหา

ได้ทำการนำข้อมูลจากการตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ ในระหว่างวันที่ 13 - 21 ธันวาคม พ.ศ.2546 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการจัดงานอัญชามรดกโลก และช่วงทำการตรวจวัด ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในงานอัญชามรดกโลก

ตารางที่ 4.1 ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ

วันที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในพันล้านส่วน,ppb)
13 ธ.ค. 2546	2.3
14 ธ.ค. 2546	3.0
15 ธ.ค. 2546	2.9
16 ธ.ค. 2546	2.7
17 ธ.ค. 2546	2.4
18 ธ.ค. 2546	2.3
19 ธ.ค. 2546	*
20 ธ.ค. 2546	3.9
21 ธ.ค. 2546	3.8
ค่ามาตรฐาน	300

หมายเหตุ * ไม่มีข้อมูลการตรวจวัด

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2546)

ซึ่งตามพระราชบัญญัติ ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 กำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไว้ที่ 300 ส่วนในพันล้านส่วน ดังนั้นค่าที่ได้จากการตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ของจังหวัดพระนครศรีอยุธยาทั้ง 9 วัน มีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย

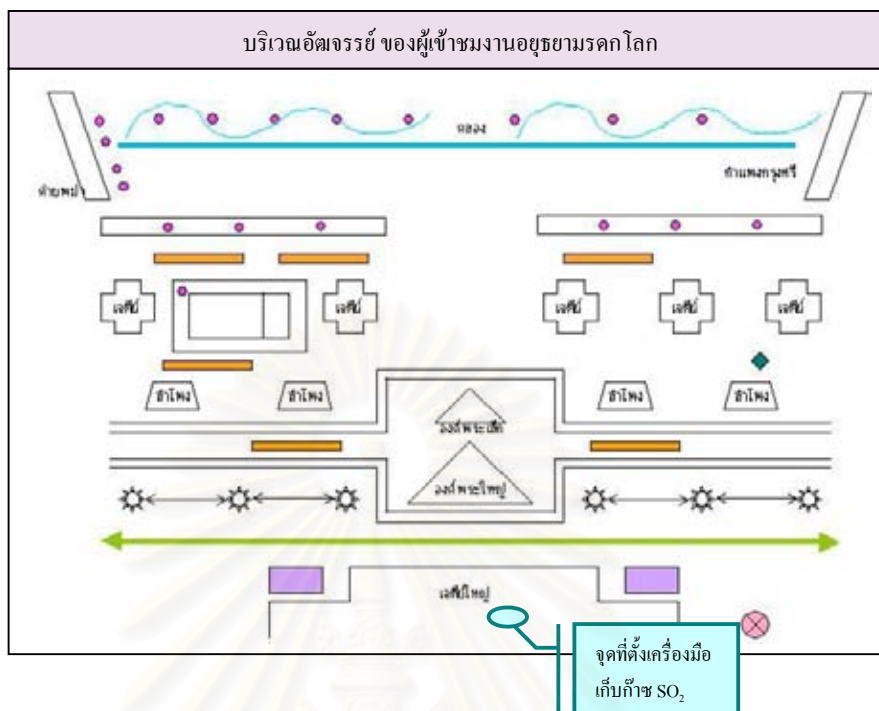
โดยวัดพระรามที่ใช้เป็นที่ตั้งในการแสดงนี้ตั้งอยู่บนพื้นที่กลางเกาะเมือง ทางด้านทิศ ตะวันออกของพระราชวังโบราณ ใกล้กับบึงพระราม (ในอดีต คือ หนองโสน) ซึ่งเป็นหนองน้ำที่มีมาก่อนการสร้างกรุงศรีอยุธยา มีฐานะเป็นพระอารามหลวงในสมัยอยุธยา พระราชพงศาวดารของ กรุงศรีอยุธยาได้ระบุว่าสมเด็จพระรามาธิบดีวร โปรตฯ ให้สร้างขึ้นตรงที่ถวายพระเพลิงพระบรมศพของ สมเด็จพระเจ้าอยู่ทอผู้เป็นพระราชบิดา เมื่อ พ.ศ. 1912 มาภายหลังปรากฏได้รับการบูรณะปฏิสังขรณ์ ครั้งใหญ่ในรัชกาลสมเด็จพระบรมไตรโลกนาถ และสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวบรมโกศ

ภายในวัดประกอบด้วยปราสาทประธานขนาดใหญ่ก่ออิฐสอดิน ตั้งอยู่บนฐานไพที สี่เหลี่ยม มีปราสาทขนาดเล็ก 2 องค์ สร้างขนาบอยู่ทางด้านทิศเหนือและใต้ และมีเจดีย์ประจำที่มุมทั้งสี่ ของฐานไพทีด้วย ผนังคูหาและผนังกรูของปราสาทประธานมีภาพจิตรกรรมฝาผนังสมัยอยุธยาตอนต้น เป็น ภาพพระอดีตพุทธ และมีภาพขุ้มเรือนแก้วประดับด้านหลังขององค์พระอดีตพุทธ

2) การเลือกที่ตั้งเครื่องมือ

บริเวณของจุดติดตั้งเครื่องมือเก็บตัวอย่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น ได้ทำการติดตั้ง บริเวณพื้นที่โล่งด้านหลังเจดีย์ใหญ่ เนื่องจากช่วงที่ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซนี้ อยู่ในช่วงของ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จึงได้ทำการติดตั้งชุดเครื่องมือตรวจวัดก๊าซในทิศตะวันตกเฉียงใต้ของตัว ผู้รับ (receptor) ซึ่งในที่นี้คือ เจดีย์ใหญ่ และนอกจากนี้ยังเลือกติดตั้งในส่วนที่เครื่องมือจะไม่สามารถ ได้รับความเสียหายจากการแสดงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- หมายเหตุ : สัญลักษณ์
- หมายถึง ประตู
 - หมายถึง ภาชนะทำด้วยสังกะสี
 - หมายถึง พลูเล็กขนาด 2 นิ้ว
 - ↔ หมายถึง พลูโรมัน
 - หมายถึง พะเนียงเล็ก
 - X หมายถึง พลูใหญ่ขนาด 4 นิ้ว
 - ◆ หมายถึง จุดปล่อยขโมย

ที่มา : สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา (2547)

รูปที่ 4.2 แผนผังตำแหน่งการจัดวางพลู ประตู และเครื่องมือตรวจวัดก๊าซ

จากรูปที่ 4.2 นี้ สามารถแสดงรายละเอียดของดอกไม้ไฟที่ใช้ในงานอุทยานมรดกโลก จากสัญลักษณ์ต่างๆ ดังนี้

- (1) ประตู ใช้ในการแสดงแทนลูกปิ่น ให้ระเบิดเมื่อยิงปิ่น และเป็นใหญ่
- (2) ภาชนะทำด้วยสังกะสี ขนาด 0.5 x 2 เมตร เพื่อใส่กระสอบชุบน้ำมัน แล้วทำการเผาในฉากเผาเมือง โดยใช้กระสอบปริมาณ 1 ส่วน 4 ของเนื้อผ้ากระสอบ ของการเผาแต่ละรอบแสดง และวางห่างจากโบราณสถาน 3 เมตร สูงจากพื้น 1 – 1.5 เมตร (ทั้งหมดมี 6 จุด)

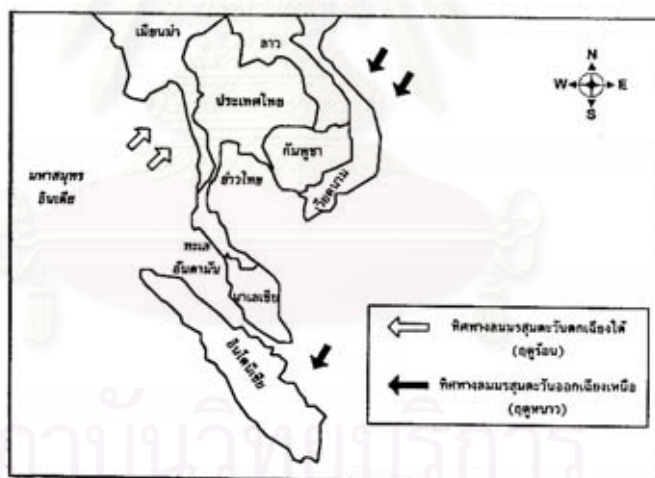
(3) พลุเล็กขนาด 2 นิ้ว วางห่างจากโบราณสถาน 3 เมตร ยิงขึ้นบนท้องฟ้า จำนวน 24 นัด ต่อ 1 รอบการแสดง (วางอยู่กับพื้นดิน)

(4) พลุโรมัน เป็นลักษณะกระบอกกระดาศ เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซ็นติเมตร มี ขายทั่วไป ใน 1 กระบอก มีพลุ 60 นัด ใช้ 50 กระบอก ต่อ 1 รอบการแสดง (วางอยู่กับพื้นดิน)

(5) พะเนียงเล็ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 12 นิ้ว เป็นลักษณะสะเก็ด ไฟพุ่งออกจากกระบอก ใช้ 2 กระบอก ต่อ 1 รอบการแสดง (วางอยู่บนนั่งร้าน) ใกล้กับพระปราสาทองค์ใหญ่ ห่างจากพระปราสาทประมาณ 10 เมตร

(6) พลุใหญ่ขนาด 4 นิ้ว วางอยู่ด้านหลังพระปราสาทองค์ใหญ่ โดยห่างออกไป ประมาณ 100 เมตร เป็นลักษณะยิงขึ้นไปแตกบนท้องฟ้า ใช้ 50 นัด ต่อ 1 รอบการแสดง

(7) จุดปล่อยโคมลอย โดยโคมลอยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ปล่อยโคมลอยทำ จากกระดาศชุบเทียน ไว้สำหรับจุดไฟให้เกิดความร้อนให้โคมลอยขึ้น ใช้ 50 โคม ต่อ 1 รอบการแสดง



ที่มา : แสงสันต์ พานิช (2545)

รูปที่ 4.3 ทิศทางของลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทย

3) ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการตรวจวัดด้วยวิธีพาราโรซานิลิน

ได้ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 วัน คือ 18-20 ธันวาคม 2546 โดยมีรายละเอียด และวิธีการคำนวณแสดงที่ภาคผนวก ข.2

จากผลการตรวจวัดพบว่า ในวันที่ 18, 19 และ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2546 มีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ บริเวณวัดพระราม เป็น 7.0781, 10.2127 และ 11.9822 ส่วนในพันล้านส่วน ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ในวันที่ 19 และ 20 ธันวาคม นั้นจะมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาก เนื่องจาก 2 สาเหตุด้วยกัน นั่นคือมีการสะสมของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศ และเนื่องจากวันที่ 19 และ 20 ธันวาคม ซึ่งเป็นวันศุกร์ และวันเสาร์ ตามลำดับ จะมีการแสดง แสง เสียง เพิ่มเป็น 2 รอบ

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในพื้นที่ศึกษา

วันที่	ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ *
18 ธ.ค. 2546	7.0781
19 ธ.ค. 2546	10.2127
20 ธ.ค. 2546	11.9822
ค่ามาตรฐาน	300

หมายเหตุ * มีหน่วยเป็น ส่วนในพันล้านส่วน (ppb, 1/1,000,000,000)

จากค่าการตรวจวัดในบริเวณวัดพระรามนี้ เมื่อได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าการตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทำให้ทราบว่าจากกิจกรรมที่จัดขึ้นในงานอัญชามรดกโลก ทำให้โบราณสถานบริเวณวัดพระรามนั้น ได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากขึ้น ประมาณ 4 เท่า ของในสภาวะบรรยากาศปกติ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจากการจัดกิจกรรมงานอัญชามรดกโลก ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งนี้ค่าจากการตรวจวัดนั้นยังไม่เกินค่ามาตรฐานของคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปของประเทศไทย โดยปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มีการกำหนดไว้ที่ 300 ส่วนในพันล้านส่วน ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้กำหนดภายใต้การเกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นนี้จึงยังไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ที่เข้าร่วมงาน แต่ในส่วนผลกระทบของวัสดุ หรือโบราณสถาน ยังไม่มีค่ามาตรฐานกำหนดไว้

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบผลการตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในพื้นที่ศึกษา และจากข้อมูล การตรวจวัดของ กรมควบคุมมลพิษ

วันที่	ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในพันล้านส่วน, ppb)	
	กรมควบคุมมลพิษ (จากตาราง 4.1)	บริเวณงานอุทยานมรดกโลก (จากตาราง 4.2)
18 ธ.ค. 2546	2.4	7.1
19 ธ.ค. 2546	ไม่มีข้อมูล	10.2
20 ธ.ค. 2546	3.9	12.0
ค่าเฉลี่ย	3.2	9.8
ค่ามาตรฐาน	300	

4.2 การพัฒนาวิธีการ

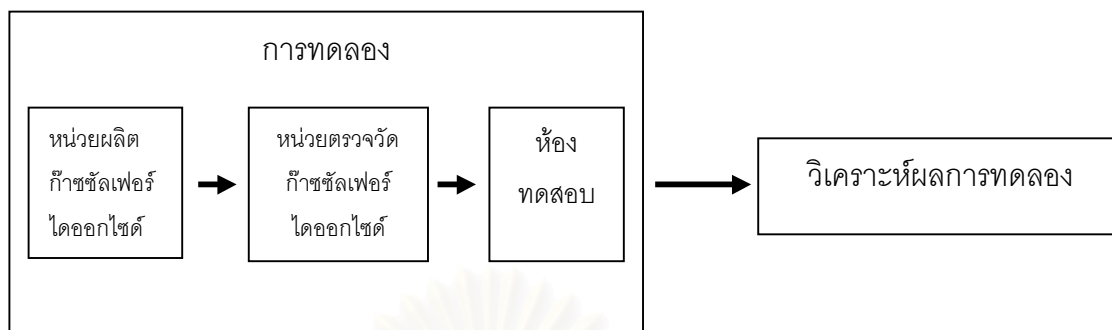
จากการศึกษาถึงความต้องการในงานวิจัยนี้ ซึ่งต้องการศึกษาการกีดกร่อนที่เกิดขึ้นจากการที่ วัสดุตัวอย่างเข้าสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนั้นในส่วนของวิธีการที่จะ ต้องทำการพัฒนาขึ้นมานั้น จะต้องประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

1) ส่วนของการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของการผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, การ ตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และห้องทดสอบ

โดยส่วนของการผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะต้องสามารถผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออก มาแล้วทำการตรวจวัดได้ว่า ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้นี้ เป็นไปตามที่ต้องการ ทดลองหรือไม่ และห้องทดสอบจะเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการกีดกร่อน นั่นคือเป็นส่วนที่วัสดุจะต้องเข้า สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ นั่นเอง

2) ส่วนการวิเคราะห์ผลการทดลอง นั่นคือเมื่อเราทำการทดลองเสร็จแล้ว จะต้องนำวัสดุที่ผ่าน การทดลองมาแล้ว มาทำการวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้น

ดังนั้นเมื่อทำการศึกษาถึงความต้องการของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือทำการ ศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนานำเอาอุปกรณ์ หรือวิธีการต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการวิจัย ดัง รายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 แผนผังส่วนประกอบของเครื่องมือศึกษาการกักกร่อน

4.2.1 องค์ประกอบของเครื่องมือ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว องค์ประกอบของเครื่องมือจึงประกอบไปด้วย การผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, การตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ห้องทดสอบ และเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการกักกร่อน

1) การผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

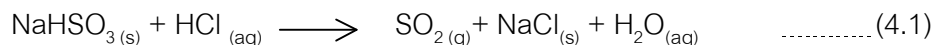
(1) ถังก๊าซ

ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ ของตัวผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากถังบรรจุก๊าซ ผลปรากฏว่าหากจะทำการผลิตก๊าซโดยการซึ่งบรรจุในถังนั้น ตรงบริเวณทางออกของถังจะต้องทำการติดตั้งเรกูเลเตอร์ (regulator) ไว้เพื่อปรับความดันของก๊าซที่ออกจากถัง เนื่องจากภายในถังบรรจุก๊าซนั้นมีความดันที่สูงมากหากไม่ทำการติดตั้งเรกูเลเตอร์ จะทำให้มีแรงดันก๊าซระเบิดออกมาได้ จากนั้นจะต้องมีโรตاميเตอร์ (rotameter) ซึ่งสามารถปรับ และวัดปริมาณก๊าซที่ผ่านโรตاميเตอร์ก่อนที่จะเข้าสู่ห้องทดสอบต่อไป

แต่เนื่องจากได้ทำการติดต่อสั่งซื้อถังก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว ปรากฏว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซอันตรายที่จะต้องสั่งและขออนุญาตนำเข้าจากต่างประเทศ ตลอดจนมีราคาสูง ซึ่งในการทดลองใช้ในปริมาณเพียงนิดเดียว คือในระดับส่วนในล้านส่วนเท่านั้น จึงไม่คุ้มที่จะทำการผลิตด้วยวิธีการนี้

(2) ผลิตจากปฏิกิริยาเคมี

จากปัญหาข้างต้น จึงได้ทำการศึกษาหาวิธีต่อมา โดยศึกษาจากปฏิกิริยาทางเคมีที่สามารถเกิดผลผลิตเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าสามารถผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้จากสมการ



นั่นคือ ทำการเตรียมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (6M HCl) จำนวน 5 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO₃) 1.7 กรัม โดยสามารถผลิตก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ประมาณ 50 - 55 มิลลิลิตร (Department of Chemistry, Creighton University, 1997) ซึ่งสามารถเตรียมได้ใหม่เมื่อต้องการทำการทดลอง และสามารถเตรียมในขวดแก้วซึ่งทนต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้

2) การตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(1) แก๊สโครมาโตกราฟี

เป็นเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดสารประกอบต่างๆ ได้ โดยทำให้สารประกอบอยู่ในรูปของก๊าซ ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของสารประกอบในรูปของก๊าซได้ดี และมีประสิทธิภาพมาก แต่เนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซที่อันตราย และมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง สามารถสร้างความเสียหายให้แก่เครื่องมือได้ จึงทำให้หน่วยงานทุกที่ที่ติดต่อไปไม่สามารถให้ความร่วมมือได้ ทั้งนี้เครื่องมือดังกล่าวมีราคาที่สูง ตลอดจนมีจำนวนเครื่องน้อย และมีคนใช้ในการศึกษาวิจัยค่อนข้างมาก การตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวิธีการนี้จึงไม่มีความเหมาะสม

(2) พาราโรซานิซีน

วิธีการนี้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ว่าเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานในการตรวจวัด แต่เนื่องจากวิธีการนี้จะต้องมีการดูดอากาศเข้าสู่หลอดตัวจับก๊าซเป็นปริมาณมาก ซึ่งอากาศภายในห้องทดสอบนั้นไม่เพียงพอจึงไม่สามารถใช้วิธีการนี้ในการหาความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้

(3) เครื่องตรวจวัดอากาศ MultiRAE

เป็นเครื่องมือตรวจวัดแบบ Multigas Monitor นั่นคือเครื่อง MultiRAE ได้ออกแบบให้สามารถวัดก๊าซได้หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีขนาด Walkman การวัดเป็นแบบต่อเนื่อง (real time) และเกิดสัญญาณเสียงเตือนทันทีที่ค่าเกินกว่าที่ตั้งไว้ ซึ่งการตั้งค่าเตือน และการสอบเทียบ (Calibrate) ด้วย standard calibration gas จะตั้งมาจากโรงงานผลิตแล้ว เมื่อชาร์จไฟเต็มจะวัดค่าได้ทันที

ซึ่งมีลักษณะโดยทั่วไปของตัวเครื่อง MultiRAE สรุปได้ดังแสดงในตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 ลักษณะทั่วไปของเครื่อง MultiRAE

Multi Gas Monitor Specification	
ขนาด	ยาว 4.65 นิ้ว x กว้าง 3.0 นิ้ว x สูง 1.9 นิ้ว
น้ำหนัก	รวมแบตเตอรี่ด้วยมีขนาด 10 ออนซ์ (454 กรัม)
การวัด	มีถึง 5 ชนิด (ออกซิเจน, ก๊าซเผาไหม้, ก๊าซมลพิษ 2 ชนิด และ VOC) ตัว sensor แบบ Electrochemical สำหรับตัววัดก๊าซมลพิษ และออกซิเจน, ตัว sensor แบบ Photo-ionization สำหรับวัด VOC, ตัว sensor แบบ catalytic สำหรับวัดก๊าซเผาไหม้
แบตเตอรี่	Ni-Cd battery สามารถชาร์จไฟได้ 4.8 V/1400mAh
Operating Time	ทำงานต่อเนื่อง 10 ชั่วโมง ควบคุมด้วยระบบ Microcomputer
การอ่านค่า	อ่านค่าได้ทันที (ทั้ง 5 ชนิด) แสดงตัว sensor, ค่าต่ำสุดและสูงสุด ของทุกตัวตรวจวัด, ค่า TWA และ STEL สำหรับก๊าซ มลพิษ และ VOC, battery voltage และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงเวลาปัจจุบัน
Calibration	มีสองจุดที่ทำ Calibrate คือ fresh air และ standard reference gas
Sampling Pump	อัตราการไหล 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
Intrinsic Safety	UL & cUL Class 1, Division I, Group A. B. C. D (US & Canada), Eex ia IIC (T4 Europe)
Protection	มีรหัสผ่าน เพื่อป้องกันการ Calibrate, การตั้ง Alarm limit และข้อมูลต่างๆ
EM Interference	ไม่มีผลกระทบ
Data Storage	อ่านค่าได้ 20,000 ค่า (64 ชั่วโมง, 5 ช่องที่เวลา 1 นาที)
Datalog Interval	สามารถโปรแกรมได้ 1 – 3,600 วินาที
Communication	การ down load ข้อมูลไปยัง PC และ up load จาก PC ผ่านสาย RS – 232 ไปที่ serial port ของ PC
temperature	-20 ถึง 45 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 95 เปอร์เซ็นต์
Configuration	ก๊าซ 2, 3, 4 หรือ 5 ชนิด, สามารถใช้หรือไม่ใช้ปั๊ม, มีหรือไม่มี Datalogger

ที่มา : บริษัท เอกเสคคิวทีฟเทรคดิง (2542)

และนอกจากนี้เครื่อง MultiRAE สามารถวัดก๊าซในหลายๆ ก๊าซ ในเวลาเดียวกันได้ ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดที่ทำการวัดนั้นก็ยังมีข้อจำกัดของช่วงการวัดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อจำกัดของช่วงการวัดของก๊าซแต่ละชนิด ของเครื่อง MultiRAE

Gas	Range	Resolution	Response Time (t90 diffusion)
CO	0-500 ppm	1 ppm	20 sec
H ₂ S	0-100 ppm	1 ppm	30 sec
SO ₂	0-50 ppm	0.1 ppm	15 sec
NO	0-250 ppm	1 ppm	20 sec
NO ₂	0-20 ppm	0.1 ppm	25 sec
CL ₂	0-10 ppm	0.1 ppm	60 sec
O ₂	0-30 %	0.1 %	15 sec
VOC	0-200 ppm	0.1 ppm	10 sec
VOC	0-2000 ppm	1 ppm	10 sec
LEL	0-100 %	1 %	15 sec
HCN	0-100 ppm	1 ppm	60 sec
NH ₃	0-50 ppm	1 ppm	150 sec

ที่มา : บริษัท เอกเสคคิวทิฟเทรตติ้ง (2542)

ดังนั้นในการทดลองการกัดกร่อน ในส่วนของการตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น จึงใช้เครื่องตรวจวัดอากาศ MultiRAE แต่ทั้งนี้ก็ยังข้อจำกัดในการตรวจวัด นั่นคือสามารถตรวจวัดได้ใน ช่วง 0-50 ppm เท่านั้น

3) ห้องทดสอบ (testing chamber)

ในส่วนห้องทดสอบนั้น เนื่องจากเป็นส่วนของการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนระหว่างวัสดุตัวอย่างกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จึงจะต้องทำการศึกษาถึงวัสดุที่จะนำมาพัฒนาเป็นห้องทดสอบ นั่นคือในการเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดสอบก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น ต้องกระทำอย่างถูกต้องกับองค์ประกอบของก๊าซที่จะวัด จึงขออ้างอิงชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นห้องทดสอบเป็นชนิดเดียวกับท่อเก็บตัวอย่างก๊าซ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การจำแนกวัสดุที่เหมาะสมของท่อเก็บตัวอย่างก๊าซและวัสดุกรอง

ก๊าซที่ต้องการวิเคราะห์	วัสดุท่อเก็บตัวอย่าง	วัสดุกรอง
คาร์บอนมอนอกไซด์	. ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	. ① ② ③
แอมโมเนีย	. ① ② ③ ④ ⑤ ⑥	. ① ② ③
กำมะถันออกไซด์รวมและซัลเฟอร์ไดออกไซด์	. ① ② ④ ⑤ ⑥ ⑦	. ① ② ③
ไนโตรเจนออกไซด์	. ① ② ④ ⑤ ⑥	. ① ② ③
สารประกอบฟลูออไรด์	. ① ④ ⑤ ⑥	. ③
คลอรีน	. ① ② ⑤ ⑥ ⑦	. ① ② ③
ไฮโดรเจนคลอไรด์	. ① ② ⑤ ⑥ ⑦	. ① ② ③
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	. ① ② ④ ⑤ ⑥ ⑦	. ① ② ③
ไฮโดรเจนไซยาไนด์	. ① ② ④ ⑤ ⑥ ⑦	. ① ② ③

วัสดุทำท่อ

- ① แก้วแข็ง
- ② ควอตซ์ (Quartz)
- ③ เหล็กเหนียวธรรมดา
- ④ เหล็กเหนียวสแตนเลส
- ⑤ เซรามิก
- ⑥ ยางสังเคราะห์ฟลูออโร (Fluoro Resin)
- ⑦ พีวีซี (Polyvinyl Chloride)

วัสดุกรอง

- ① โยของแก้วไร้ด่าง หรือโยซิลิกา
(Non-Alkali Glass-Wool or Silica-Wool)
- ② แก้วเผา (Sintered Glass)
- ③ คาร์โบรันดัม (Carborundum)

ที่มา : ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ (2542)

ดังนั้นวัสดุที่ควรนำมาพัฒนาเป็นห้องทดสอบนั้นจึงควรทำมาจาก แก้วแข็ง, ควอร์ตซ์, เหล็กเหนียวสแตนเลส, เซรามิก, ยางสังเคราะห์ฟลูออโร และพีวีซี และเมื่อได้ทำการศึกษาวัสดุที่จะนำมาพัฒนาเป็นห้องทดสอบนั้น จึงได้โอดูดความชื้น (dessiccater) มาพัฒนาเป็นห้องทดสอบ เนื่องจากโอดูดความชื้นผลิตมาจากวัสดุชนิดแก้วแข็ง ดังนั้นจึงมีความคงทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดี และนอกจากนี้ด้วยคุณสมบัติที่เป็นสุญญากาศ จึงทำให้ตรงตามความต้องการในการที่ห้องทดสอบต้องเป็นระบบปิด เพื่อสะดวกในการควบคุมปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

นอกจากนี้ในส่วนของห้องทดสอบนั้น จะต้องสามารถฉีดก๊าซเข้าออกในห้องทดสอบได้ เพื่อในการเตรียมความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จึงได้ทำการออกแบบในส่วนหัว หรือทางเข้าด้านบนของโอดูดความชื้น เป็นจุกยาง (septum) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นสามารถใช้เข็มฉีดยาฉีดก๊าซ หรือของเหลวเข้าสู่ภายในโอดูดความชื้นได้ แต่ก๊าซภายในไม่สามารถทะลุผ่านออกมาได้ ดังนั้นจึงตรงกับความต้องการ

4) เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ศึกษาการกัดกร่อน

ได้ทำการศึกษาจากข้อมูลการวิเคราะห์การกัดกร่อนของโลหะ แล้วทำการศึกษาว่าเครื่องมือชนิดใดสามารถนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาคำตอบได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งเอาไว้ จึงได้เครื่องมือในการวิเคราะห์การกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน ดังนี้

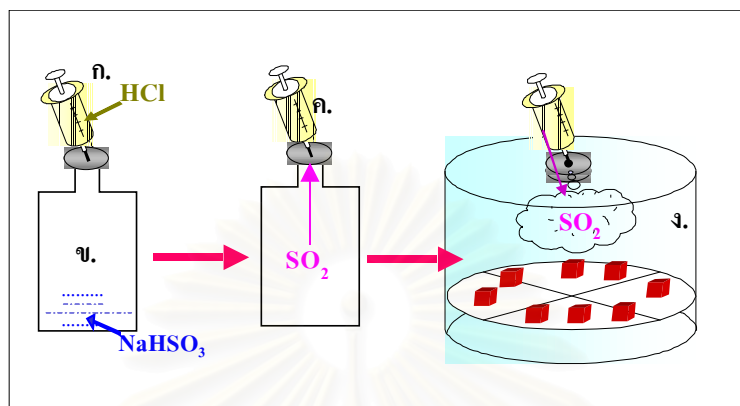
(1) เครื่องชั่ง ใช้เพื่อการศึกษาวิเคราะห์หามวล หรือน้ำหนักที่หายไป ที่เกิดจากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ในที่นี้ได้ติดต่อขอใช้จากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป ขอใช้เครื่องชั่งอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ของ Sartorius รุ่น BA210S

(2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในวัสดุตัวอย่าง ซึ่งได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์และห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาวิศวกรรมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ของ JEOL รุ่น JSM-5400

(3) เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ศึกษาองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือของภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ X-ray diffraction รุ่น D8 Advance

4.2.2 หลักการ ของวิธีการที่พัฒนา

จากหลักการ และปัญหาดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ทำให้สรุปวิธีการที่ทำการพัฒนาใช้ในการศึกษาการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน ดังนี้



หมายเหตุ :

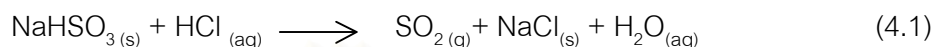
- ก. หมายถึง กระบอกฉีดยา
- ข. หมายถึง ขวดผลิตก๊าซ
- ค. หมายถึง กระบอกฉีดยาก๊าซ
- ง. หมายถึง ห้องทดสอบ

รูปที่ 4.5 แผนผังวิธีการที่ทำการพัฒนาเพื่อใช้ในการศึกษาการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน

จากรูปที่ 4.5 อุปกรณ์ที่ใช้พัฒนาวิธีการ มีรายละเอียดของอุปกรณ์ และหลักการของวิธีการ ดังนี้

- 1) กระบอกฉีดยา (syringe) ขนาด 10 ml เพื่อทำการฉีดกรดลงไปในขวดผลิตก๊าซ
- 2) ขวดแก้วผลิตก๊าซ ซึ่งเป็นส่วนทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กับ โซเดียมไฮซัลไฟต์ (NaHSO_3) โดยปากขวดปิดด้วยเซปตัม (septum) เพื่อให้เข็มของกระบอกฉีดยาสามารถเจาะเข้าไปได้โดยก๊าซไม่สามารถผ่านออกมาได้
- 3) กระบอกฉีดยาก๊าซ (gas syringe) ขนาด 1 ml ทำหน้าที่ในการดูดก๊าซที่เตรียมได้จากขวดผลิตก๊าซ และฉีดเข้าห้องทดสอบ
- 4) ห้องทดสอบ (testing chamber) มีปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร โดยพัฒนามาจาก dessiccator โดยฝาปิดด้านบนนั้นได้ทำการเปลี่ยนเป็นฝาเซปตัม ซึ่งเข็มของกระบอกฉีดยาก๊าซสามารถเจาะทะลุลงไปได้ และก๊าซที่อยู่ภายในห้องทดสอบนี้ไม่สามารถผ่านออกมาได้ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ใส่วัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบให้สัมผัสกับก๊าซที่มีความเข้มข้นต่างๆ ที่กำหนดไว้ เพื่อดูการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น

ในการทำการทดลองนี้ ต้องการดูการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งทำการเตรียมก๊าซจากกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ทำปฏิกิริยากับ โซเดียมไฮซัลไฟต์ (NaHSO₃) ในขวดผลิตก๊าซ ดังสมการ 4.1 ด้วยการฉีดกรดในระบบอกซิดายาลงไปในขวดผลิตก๊าซซึ่งมีโซเดียมไฮซัลไฟต์



เมื่อได้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในขวดผลิตก๊าซแล้ว ให้ทำการดูดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยระบบอกซิดายาลง แล้วฉีดก๊าซลงไปในห้องทดสอบซึ่งมีวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบอยู่ภายใน และปิดฝาเรียบร้อยแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากระบบที่ทดสอบจะต้องเป็นระบบปิด เพื่อควบคุมความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4.2.3 ผลการทดสอบเครื่องมือ

1) ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ

ทำการตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ทั้งภายใน และภายนอก ห้องทดสอบ โดยเครื่องมือตรวจวัดอุณหภูมิ (Micrologger) แล้วนำมาทำการเปรียบเทียบ

พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ย ของภายในและภายนอกห้องทดสอบ เป็น 29.67 และ 29.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ของภายในและภายนอก ห้องทดสอบ เป็น 71.5 และ 72.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.7

ดังนั้นจากผลการตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความแตกต่างที่ได้ของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิภายในและภายนอกห้องทดสอบ เท่ากับ 1.16 เปอร์เซ็นต์ และค่าความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์ภายในและภายนอกห้องทดสอบ เท่ากับ 0.97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจวัดภายในและภายนอกห้องทดสอบ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
	ภายนอกห้องทดสอบ	ภายในห้องทดสอบ	ภายนอกห้องทดสอบ	ภายในห้องทดสอบ
1	29.33	29.67	73.0	72.0
2	29.33	29.67	73.0	72.0
3	29.33	29.67	72.5	72.0
4	29.33	29.67	72.0	71.5
5	29.33	29.67	72.0	71.5
6	29.33	29.67	72.0	71.5
7	29.33	29.67	72.0	71.0
8	29.33	29.67	72.0	71.0
9	29.33	29.67	72.0	71.0
10	29.33	29.67	71.5	71.0
ค่าเฉลี่ย	29.33	29.67	72.2	71.5

ดังนั้นในการทดลองอัตราการกัดกร่อนจึงสามารถอ้างอิงสภาวะที่ทำการทดลอง ภายใต้สภาวะบรรยากาศทั่วไป ทั้งนี้จากเครื่องมือตรวจวัดอุตุนิยมวิทยา (Meteorological Monitoring System) บนดาตฟ้าของตึกภาควิชาวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ตลอดระยะเวลาการทดลอง ได้ดังนี้

อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส
 ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เตรียมกับที่ตรวจวัดได้

ได้ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทำการเตรียมขึ้นมา ที่ความเข้มข้นต่างๆ ภายในห้องทดสอบ โดยเครื่อง MULTIRAE IR เนื่องจากมีข้อจำกัดของเครื่องมือ ซึ่งมีความถูกต้องในการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ 50 ส่วนในล้านส่วน จึงสามารถทำการตรวจวัดทดสอบปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องทดสอบ ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 50 ส่วนในล้านส่วน เท่านั้น นั่นคือทำการตรวจสอบที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วนในล้านส่วน

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้โดยเครื่อง MULTIRAE IR จากการเตรียมก๊าซที่ความเข้มข้นต่างๆ

ครั้งที่	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)				
	10	20	30	40	50
1	8.7	18.2	29.1	38.9	48.7
2	10.0	19.5	29.6	39.8	49.7
3	10.1	19.9	30.2	40.7	50.5
4	10.4	21.3	30.5	41.6	51.8
5	11.5	22.2	32.4	41.9	52.9
ค่าเฉลี่ย	10.14	20.22	30.36	40.58	50.72

จากผลการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าความเข้มข้นที่เตรียมจากการทดลอง คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วนในล้านส่วน เมื่อทำการตรวจวัดโดยเครื่อง MULTIRAE IR ได้ 10.14, 20.22, 30.36, 40.58 และ 49.72 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ นั่นคือมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ 1.40, 1.10, 1.20, 1.45 และ 1.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นจากการเตรียมการทดลอง เมื่อเทียบกับค่าจากการตรวจวัด มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถยอมรับได้

3) การกักกรองที่เกิดขึ้น

ตรวจสอบการกักกรองที่สามารถสังเกตได้ โดยการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ชั่งไว้ก่อนการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปรากฏว่าวัสดุตัวอย่างที่ทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 2 สัปดาห์ มีน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างหายไป 0.0061, 0.0063, 0.0072, 0.0077 และ 0.0082 กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ปริมาณน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างที่หายไปหลังการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	น้ำหนักก่อนสัมผัส (กรัม)	น้ำหนักหลังสัมผัส (กรัม)	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)
50	14.2179	14.2118	0.0061
100	7.5225	7.5162	0.0063
200	9.5770	9.5700	0.0072
400	9.7189	9.7112	0.0077
800	13.4424	13.4342	0.0082

จากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบว่า เครื่องมือและวิธีการที่ทำการพัฒนาขึ้นมาเพื่อศึกษาการกักกรองและอัตราการกักกรองนั้น สามารถวิเคราะห์และทำการตรวจวัดการกักกรองที่เกิดขึ้นได้ นั่นคือมีการกักกรองที่แสดงในลักษณะของน้ำหนักที่หายไป ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการกักกรองต่อไปได้

4.3 ลักษณะของวัสดุตัวอย่าง

4.3.1 ศึกษาคุณสมบัติของอิฐและปูนปั้น

1) ความหนาแน่น

หลังจากทำการวิเคราะห์หาความหนาแน่น โดยการหามวล (กรัม) ของวัสดุตัวอย่าง ด้วยการชั่งน้ำหนัก และหาปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยใช้การแทนที่น้ำในกระบอกยูเรกา แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ 3.9 (แสดงในภาคผนวก ก) ผลปรากฏว่า อิฐเก่ามีความหนาแน่นเท่ากับ 2.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อิฐปัจจุบันมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปูนปั้นเก่ามีความหนาแน่นเท่ากับ 1.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และในปูนปั้นปัจจุบันมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความหนาแน่นของวัสดุตัวอย่าง

วัสดุตัวอย่าง	ความหนาแน่น * (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
อิฐเก่า	2.1
อิฐปัจจุบัน	1.8
ปูนปั้นเก่า	1.9
ปูนปั้นปัจจุบัน	2.0

จากผลการทดลองที่ได้นี้ เป็นการหาความหนาแน่นของวัสดุตัวอย่างที่ได้นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งทั้งนี้อิฐและปูนปั้นในแต่ละที่จะมีกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นความหนาแน่นของอิฐและปูนปั้นจึงอาจจะไม่เท่ากัน ดังนั้นความหนาแน่นที่ได้นี้จึงใช้อ้างอิงเฉพาะในงานวิจัยนี้เท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ศึกษาองค์ประกอบภายในของวัสดุตัวอย่าง

นำวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และ ปูนปั้นปัจจุบัน มาทำการศึกษาองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) รุ่น D8 Advance

พบว่าหลังจากนำวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (ตาราง 4.11)

(1) ในอิฐเก่าองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ คือ ควอร์ซ (Quartz, SiO_2) และ ไคเซไรต์ (Kieserite, $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

(2) อิฐปัจจุบันองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ คือ ควอร์ซ (Quartz, SiO_2)

(3) ปูนปั้นเก่าองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ คือ ควอร์ซ (Quartz, SiO_2), แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) และแอนไฮไดรต์ (Anhydrite, CaSO_4)

(4) ปูนปั้นปัจจุบันองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ คือ ควอร์ซ (Quartz, SiO_2), แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) และ พอร์ตแลนด์ไดต์ (Portlandite, Ca(OH)_2)

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบของวัสดุตัวอย่างก่อนการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่วิเคราะห์พบโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

วัสดุตัวอย่าง	องค์ประกอบ
อิฐเก่า	ควอร์ซ, ไคเซไรต์
อิฐปัจจุบัน	ควอร์ซ
ปูนปั้นเก่า	ควอร์ซ, แคลไซต์, แอนไฮไดรต์
ปูนปั้นปัจจุบัน	ควอร์ซ, แคลไซต์, พอร์ตแลนด์ไดต์

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบภายในวัสดุตัวอย่าง ก่อนที่จะทำการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นี้ เป็นการวิเคราะห์เพื่อการศึกษาถึงองค์ประกอบภายในของวัสดุตัวอย่าง เพื่อที่จะนำผลของการวิเคราะห์นี้ ไปเปรียบเทียบกับองค์ประกอบภายในของวัสดุตัวอย่างที่เกิดขึ้นหลังจากทำการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการวิเคราะห์ต่อไป

4.4 ผลการกัดกร่อน

4.4.1 การตรวจสอบลักษณะภายนอกด้วยการสังเกต

เป็นการตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนภายนอก ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ทั้งนี้ได้ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ดังนี้

1) อีฐูเก๋า

วัสดุตัวอย่างประเภทอีฐูเก๋านั้น เมื่อทำการสังเกตก่อนเริ่มการทดลองพบว่าพื้นผิวของอีฐูเก๋ามีผลึกสีขาวอยู่ก่อนแล้ว จึงได้ทำการปรับแต่ง ทำความสะอาดอีฐูเก๋าก่อนจะทำการทดลองให้มีลักษณะเหมือนกันทุกก้อน โดยการสกัดเอาผลึกสีขาวออกดังรูปที่ 4.6



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 ลักษณะของอีฐูเก๋าก่อนทำการทดลอง

(ก) อีฐูเก๋าก่อนทำความสะอาด

(ข) อีฐูเก๋าหลังทำความสะอาด

หลังจากได้นำอีฐูเก๋าทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน ผลปรากฏว่าในสัปดาห์ที่ 1 - 10 นั้น จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกัน คือที่ผิวของอีฐูเก๋านั้นมีผลึกสีขาวเกิดขึ้น

จากการสังเกตอีฐูเก๋าที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้ง 5 ความเข้มข้นพบว่า สามารถสังเกตพบผลึกสีขาวเกาะอยู่บริเวณผิวของอีฐูเก๋า ตั้งแต่ในสัปดาห์ที่ 1 โดยเฉพาะในอีฐูเก๋าที่สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน ส่วนอีฐูเก๋าที่สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 และ 200 ส่วนในล้านส่วนนั้น สังเกตเห็น

ผลึกสีขาวในสัปดาห์ที่ 2 และอิฐเก่าที่ทำการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน สังเกตเห็นผลึกสีขาวในสัปดาห์ที่ 4



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของอิฐเก่าที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(ก) บริเวณพื้นผิวภายนอกอิฐเก่า

(ข) บริเวณพื้นผิวภายในอิฐเก่า

จากรูป 4.7 (ก) คือก้อนอิฐเก่าที่ทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในส่วนที่วงกลมคือผลึกสีขาวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอิฐเก่า โดยเมื่อทำการกระเทาะอิฐเก่าเพื่อศึกษา ผิวภายในพบว่าพื้นผิวภายในของอิฐเก่าก็พบผลึกสีขาวนี้เช่นกัน ดังรูปที่ 4.7 (ข)

2) อิฐปัจจุบัน

วัสดุตัวอย่างประเภทอิฐปัจจุบันนั้น ก่อนทำการทดลองพื้นผิวมีลักษณะเรียบ ไม่พบผลึกสีขาว ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อิฐปัจจุบันก่อนทำการทดลอง

ผลจากการสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนอิฐปัจจุบันนั้น มีลักษณะเช่นเดียวกันกับอิฐเก่า นั่นคือเกิดผลึกสีขาวขึ้นบนพื้นผิวของอิฐปัจจุบัน ดังที่ในรูปที่ 4.9 (ก) ซึ่งได้แสดงผลึกสีขาวที่เกิดขึ้นที่ผิวภายนอกอิฐปัจจุบัน โดยได้วงกลมรอบผลึกสีขาวที่เกิดขึ้น และนอกจากนั้นยังพบว่าภายในอิฐปัจจุบันเมื่อทำการกระแทกออกมาจะพบผลึกสีขาวเกิดขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 4.9 (ข) ภายในวงกลมแสดงผลึกสีขาวที่เกิดขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของอิฐปัจจุบันที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(ก) บริเวณพื้นผิวภายนอกอิฐปัจจุบัน

(ข) บริเวณพื้นผิวภายในอิฐปัจจุบัน

วัสดุตัวอย่างอิฐปัจจุบันนี้ จะสามารถสังเกตด้วยตาเปล่าพบผลึกสีขาวหลังสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 และ 100 ส่วนในล้านส่วน ในสัปดาห์ที่ 4 ส่วนผลึกเกลือที่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่าหลังสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน พบในสัปดาห์ที่ 3, 2 และ 1 ตามลำดับ

3) ปูนปั้นเก่า

วัสดุตัวอย่างประเภทปูนปั้นเก่า มีลักษณะร่วนทำให้การปรับแต่งรูปร่างค่อนข้างลำบาก และพบผลึกสีขาวบนพื้นผิวของปูนปั้นเก่า จึงต้องทำการปรับแต่ง และทำความสะอาดวัสดุตัวอย่าง เช่นเดียวกับอิฐเก่า ดังรูปที่ 4.10



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของปูนปั้นเก่าที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(ก) ปูนปั้นเก่าก่อนทำความสะอาด

(ข) ปูนปั้นเก่าหลังทำความสะอาด

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของปูนปั้นเก่าหลังการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นค่อนข้างเห็นได้ชัดเจน นั่นคือเกิดผลึกสีขาวขึ้นบริเวณผิวของปูนปั้นเก่า ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าตั้งแต่การสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้ง 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน ตั้งแต่ในสัปดาห์ที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของปูนปั้นเก่าที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(ก) บริเวณพื้นผิวภายนอกปูนปั้นเก่า

(ข) บริเวณพื้นผิวภายในปูนปั้นเก่า

จากรูป 4.11 (ก) แสดงผิวพูนปั้นเก่าที่ทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในส่วนที่วงกลมคือผลึกสีขาวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของพูนปั้นเก่า ซึ่งจะเห็นว่าผลึกมีลักษณะเป็นวง กว้าง สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน และเมื่อทำการกระเทาะพูนปั้นเก่าเพื่อศึกษาบริเวณผิวภายในพบว่าบริเวณผิวภายในของพูนปั้นเก่าก็พบผลึกสีขาวนี้เช่นกัน ดังรูปที่ 4.11 (ข)

4) พูนปั้นปัจจุบัน

วัสดุตัวอย่างประเภทพูนปั้นปัจจุบันนั้น ก่อนทำการทดลองพื้นผิววัสดุมีลักษณะเรียบ ก่อนวัสดุมีเนื้อแน่น ไม่ร่วน ไม่พบผลึกสีขาว ดังที่พบในพูนปั้นเก่า ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 พูนปั้นเก่าก่อนทำการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ของพูนปั้นปัจจุบันหลังการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นั้น ไม่ชัดเจนเท่ากับพูนปั้นเก่า นั่นคือเกิดผลึกสีขาวเป็นจุดเล็กๆ ไม่ได้มีลักษณะเป็นวงกว้างอย่างพูนปั้นเก่า เกิดขึ้นบริเวณผิวของพูนปั้นปัจจุบัน ทั้งนี้สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าหลังการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 ส่วนในล้านส่วน ในสัปดาห์ที่ 3 ที่ความเข้มข้น 400 ส่วนในล้านส่วน สังเกตพบในสัปดาห์ที่ 2 และที่ความเข้มข้น 800 ส่วนในล้านส่วน สังเกตพบตั้งแต่ในสัปดาห์ที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.13 ผลึกสีขาวบนพื้นผิวของปูนปั้นปัจจุบันที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(ก) บริเวณพื้นผิวภายนอกปูนปั้นปัจจุบัน

(ข) บริเวณพื้นผิวภายในปูนปั้นปัจจุบัน

จากรูป 4.13 (ก) แสดงผิวปูนปั้นปัจจุบันที่ทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในส่วนที่วงกลมคือผลึกสีขาวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของปูนปั้นปัจจุบัน ซึ่งจะเห็นว่าผลึกมีลักษณะเป็นจุดสีขาว และเมื่อทำการกระเทาะปูนปั้นปัจจุบันเพื่อศึกษาบริเวณผิวภายใน พบว่าบริเวณผิวภายในของปูนปั้นปัจจุบันพบผลึกสีขาวดังเช่นที่พบในปูนปั้นเก่า แต่ไม่ชัดเจนเท่าปูนปั้นเก่า ดังแสดงใน รูปที่ 4.13 (ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 วิเคราะห์ผลึกสีขาว

ผลการทดลองดังที่ได้กล่าวมานี้ (จาก 4.4.1) พบว่าวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน มีผลึกสีขาวเกิดขึ้นทั้งบริเวณผิวภายใน และบริเวณผิวนอกของวัสดุตัวอย่าง จึงได้ทำการวิเคราะห์ต่อเพื่อศึกษาว่าผลึกสีขาวดังกล่าวนี้เป็นผลึกของอะไร ทั้งนี้จากทฤษฎีการกัดกร่อนที่ได้กล่าวมาทำให้สามารถคาดเดาได้ว่าเป็นผลึกซัลเฟต ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันการทดลองจึงได้ทำการวิเคราะห์หาซัลเฟต ดังนี้

ได้ทำการนำผลึกสีขาวดังกล่าวจากวัสดุตัวอย่างแต่ละชนิด ซึ่งได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน มาทำการละลายในน้ำกลั่น แล้วนำสารละลายที่ได้นี้มาทำให้เป็นกรดด้วยกรดเกลือเข้มข้น และหยดแบเรียมคลอไรด์ลงไป พบว่าเกิดตะกอนสีขาวของแบเรียมซัลเฟต ดังสมการ 4.2



จากผลการทดลองนี้ทำให้ยืนยันได้ว่าผลึกสีขาวที่พบบนผิววัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดนี้เป็นผลึกของเกลือซัลเฟตซึ่งเกิดจากการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

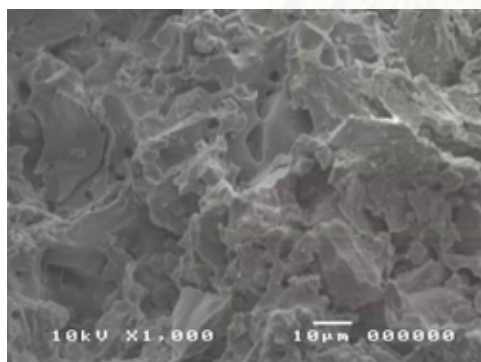
จากผลการทดลองในข้อ 4.4.1 ได้พบผลึกเกลือซัลเฟตทั้งภายในและภายนอกผิวของวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด นั้นหมายความว่า ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นสามารถแทรกซึมผ่านผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างทั้ง อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน เข้าไปทำปฏิกิริยากับวัสดุภายในได้ จนเกิดการกัดกร่อนขึ้น ซึ่งเกลือซัลเฟตเหล่านี้สามารถทำลายโครงสร้างของวัสดุจนเกิดการเสียหายได้ โดยหากผลึกเกลือซัลเฟตมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน หรือช่องว่าง ในโครงสร้างของวัสดุแล้ว มันจะดันช่องว่างให้แตกออก เกิดการเสียหาย และนอกจากนี้ลักษณะของพื้นผิวของเกลือซัลเฟตยังไม่เกาะติดกับพื้นผิวของวัสดุเดิมจึงมีการหลุดออกในลักษณะผง ฝุ่น หรือเศษดิน จึงทำให้วัสดุเกิดการเสียหายขึ้น ทั้งนี้จึงอาจทำให้สามารถวัดการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในรูปของน้ำหนักที่หายไปได้

4.4.3 ศึกษาลักษณะโครงสร้างภายใน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

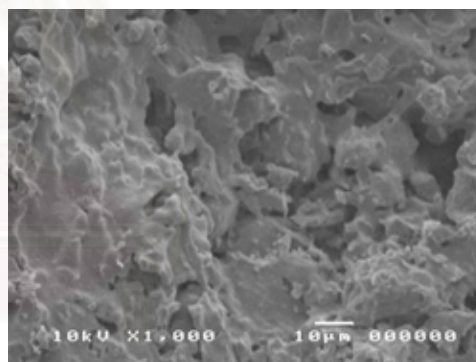
ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของวัสดุตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของวัสดุตัวอย่างก่อน และหลังทำการสัมผัสกับก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-5400 ซึ่งศึกษาด้วยกำลังขยาย 1000 เท่า

1) อิฐเก่า

เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างภายใน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างของอิฐเก่าก่อนทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยผลึกมีเหลี่ยม ดังแสดงในรูป 4.14 (ก) แต่หลังจากสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อิฐเก่ามี ลักษณะของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือเหลี่ยมของผลึกหายไป และมีช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.14 (ข)



(ก)



(ข)

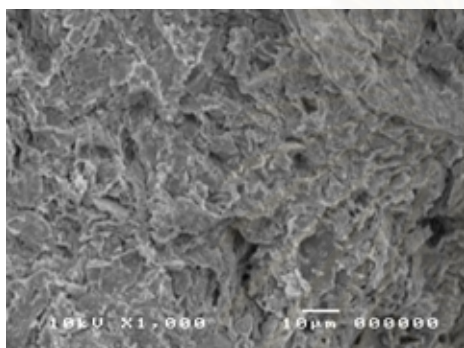
รูปที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิฐเก่า

(ก) ก่อนสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

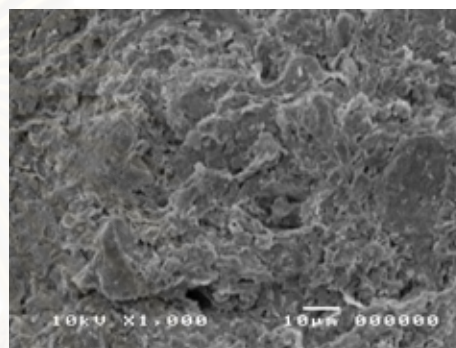
(ข) หลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2) อิฐปัจจุบัน

โครงสร้างภายในของอิฐปัจจุบันก่อน และหลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไม่สามารถอธิบายถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของลักษณะผลึกได้ เนื่องจากมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ลักษณะโครงสร้างที่สามารถเห็นได้ชัดเจน นั่นคืออิฐปัจจุบันมีช่องว่างหรือรูพรุนมากขึ้นหลังทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์



(ก)



(ข)

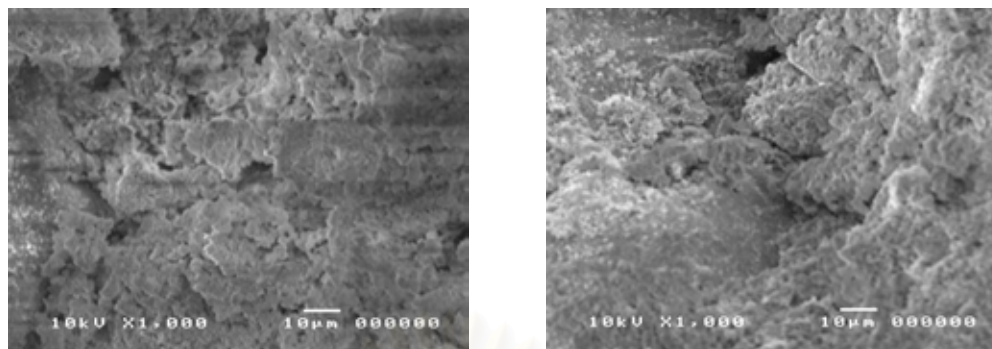
รูปที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิฐปัจจุบัน

(ก) ก่อนสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(ข) หลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

3) ปูนปั้นเก่า

ในส่วนการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในของปูนปั้นเก่า ก่อนและหลังทำการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าหลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เนื้อผลึกมีความละเอียดมากขึ้น และมีช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ดังได้แสดงในรูปที่ 4.16



(ก)

(ข)

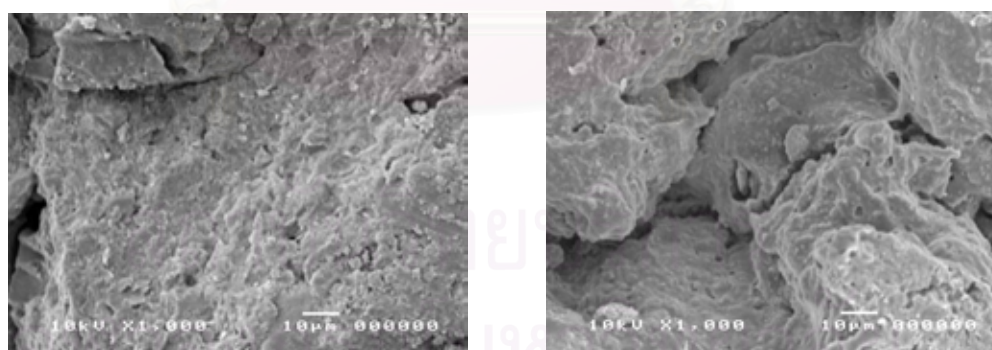
รูปที่ 4.16 ลักษณะโครงสร้างภายในของปูนปั้นเก่า

(ก) ก่อนสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(ข) หลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4) ปูนปั้นปัจจุบัน

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของปูนปั้นปัจจุบันก่อน และหลังทำการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าโครงสร้างผลึกมีการแตกออก และมีช่องว่างหรือรูพรุนมากขึ้น ดังรูป 4.17



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.17 ลักษณะโครงสร้างภายในของปูนปั้นปัจจุบัน

(ก) ก่อนสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(ข) หลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

จากผลการทดลองการศึกษาโครงสร้างภายในของวัสดุตัวอย่าง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยสรุปจะพบว่าวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน หลังจากสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วลักษณะของโครงสร้างจะมีช่องว่างหรือรูพรุนมากขึ้น นั่นคือสามารถอธิบายได้ว่าโครงสร้างภายในของวัสดุเกิดการกัดกร่อนทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของผลึกอีกด้วย โดยเมื่อมีช่องว่างของผลึกเพิ่มมากขึ้นย่อมทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดน้อยลง ง่ายต่อการแตกหัก

ทั้งนี้ช่องว่างหรือรูพรุนที่เกิดขึ้นมานี้สามารถอธิบายตามทฤษฎีได้ว่า เกลือซัลเฟตที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากเป็นเกลือชนิดที่สามารถละลายน้ำได้ดี จะกลายเป็นสารละลายของเกลือซึ่งสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุที่มีรูพรุนของวัสดุตัวอย่าง แล้วจะสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ หรือรูพรุนของเนื้อวัสดุ โดยมีน้ำเป็นตัวนำพา น้ำที่มีอยู่ในวัสดุตัวอย่างจะระเหยตรงผิวนอกสุดของวัสดุ เมื่อน้ำที่ผิวนอกสุดระเหยออกไป น้ำจากส่วนที่อยู่ถัดเข้าไปข้างในก็จะเคลื่อนตัวมาแทนที่ ซึ่งน้ำดังกล่าวจะพาเกลือซัลเฟตที่ละลายน้ำได้มาด้วย เมื่อน้ำระเหยไปเกลือระเหยไม่ได้จึงมีความเข้มข้นเรื่อยๆ จนถึงระดับหนึ่งเป็นจุดอิ่มตัวของสารละลายของเกลือซัลเฟตนี้ เกลือจะตกผลึกภายในช่องว่างเล็กๆ หรือรูพรุนของเนื้อวัสดุ และเนื่องจากความชื้นในวัสดุตัวอย่างไม่คงที่ และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศก็ไม่คงที่ เพราะฉะนั้นในบางขณะความชื้นระเหยออกไปได้มากจนวัสดุตัวอย่างแห้ง เกลือซัลเฟตจะตกผลึก และในบางขณะความชื้นระเหยออกไปได้น้อย เนื้อของวัสดุตัวอย่างเปียกเกลือซัลเฟตจะละลายน้ำกลายเป็นสารละลาย ซึ่งในวันหนึ่งๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวกลับไปมาหลายสิบครั้ง ผลึกเกลือซัลเฟตจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนในที่สุดจะขยายขนาดดันให้ช่องว่างและรูพรุนภายใน ซึ่งมีพื้นที่จำกัด ทำให้เนื้อวัสดุตัวอย่างแตกออกเกิดเป็นช่องว่างหรือรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น

4.4.4 ศึกษาองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ได้ทำศึกษาผลการทดลองหลังจากที่นำวัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นโบราณ และปูนปั้นปัจจุบัน วัสดุตัวอย่างได้ทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบภายใน ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) รุ่น D8 Advance เพื่อหาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

พบว่าหลังจากวัสดุตัวอย่างทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว มีองค์ประกอบภายในของวัสดุตัวอย่างเพิ่มขึ้นมา โดยองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ (ตาราง 4.12) ได้แก่

ในอิฐเก่าองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ คือ ควอartz (Quartz, SiO_2) และ ไคเซไรต์ (Kieserite, $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

อิฐปัจจุบันองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ คือ ควอartz (Quartz, SiO_2) และ ไคเซไรต์ (Kieserite, $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

ปูนปั้นเก่าองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ คือ ควอartz (Quartz, SiO_2), แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) และแอนไฮไดรต์ (Anhydrite, CaSO_4)

ปูนปั้นปัจจุบันองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบ คือ ควอartz (Quartz, SiO_2), แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3), แอนไฮไดรต์ (Anhydrite, CaSO_4) และ ยิปซั่ม (Gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) รุ่น D8 Advance ด้วยข้อจำกัดของข้อมูลสารประกอบภายในหน่วยความจำของเครื่องนั้นมีจำกัด ดังนั้นในความเป็นจริง อาจพบองค์ประกอบอื่นๆ ในวัสดุตัวอย่างได้อีก

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบของวัสดุตัวอย่างหลังการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่วิเคราะห์พบโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

วัสดุตัวอย่าง	องค์ประกอบ
อิฐเก่า	ควอartz, ไคเซไรต์
อิฐปัจจุบัน	ควอartz, ไคเซไรต์
ปูนปั้นเก่า	ควอartz, แคลไซต์, แอนไฮไดรต์
ปูนปั้นปัจจุบัน	ควอartz, แคลไซต์, แอนไฮไดรต์, ยิปซั่ม

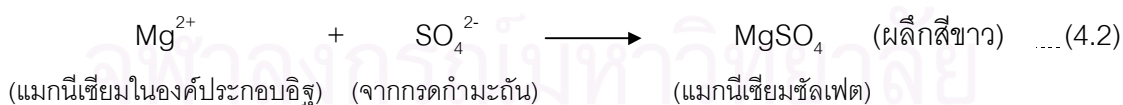
เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุตัวอย่างที่ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบภายใน ก่อนได้รับการสัมผัสโดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (จากตารางที่ 4.11) จะสามารถทราบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ตาราง 4.12) ดังแสดงในตาราง 4.13 เพื่อศึกษาปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น พบว่าในอิฐปัจจุบันมีองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นมา หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้แก่ ไคเซไรต์ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของปูนปั้นปัจจุบัน ได้แก่ แอนไฮไดรต์ และยิปซั่ม

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่างก่อน และหลังสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

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

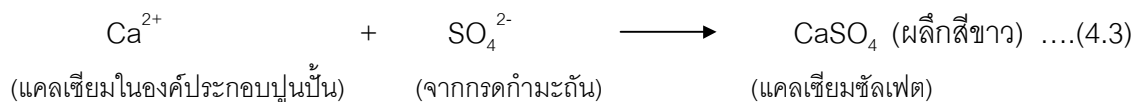
หมายเหตุ * วิเคราะห์ไม่พบองค์ประกอบอื่นซึ่งเพิ่มขึ้นมาจากองค์ประกอบที่วิเคราะห์พบก่อนที่วัสดุตัวอย่างจะสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ดังนั้นจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ทราบได้ว่า ในวัสดุประเภทอิฐ ได้แก่ อิฐเก่า และอิฐปัจจุบัน นั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ ไคเซไรต์ ($MgSO_4 \cdot H_2O$) นั่นคือเกิดเป็นเกลือแมกนีเซียมซัลเฟต สามารถอธิบายเป็นสมการเคมีดังสมการ 4.2 ซึ่งในอิฐเก่าจะพบว่าได้วิเคราะห์พบไคเซไรต์หรือเกลือแมกนีเซียมซัลเฟตนี้ตั้งแต่ก่อนทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นั่นทำให้เราสามารถคาดการณ์ได้ว่า อิฐเก่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาก่อนหน้าทำการทดลองนี้แล้ว จึงทำให้พบองค์ประกอบภายในของอิฐเก่านั้นมีเกลือแมกนีเซียมซัลเฟต



ในส่วนของวัสดุประเภทปูนปั้น ได้แก่ ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบันนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ แอนไฮไดต์ ($CaSO_4$) และ ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) นั่นคือเกิดเป็นเกลือแคลเซียมซัลเฟตนั่นเอง ซึ่งสามารถอธิบายเป็นสมการเคมีได้ดังสมการ 4.3 โดยในปูนปั้นเก่าพบว่าได้วิเคราะห์พบแอนไฮไดต์ และยิปซัม หรือเกลือแคลเซียมซัลเฟต อยู่ก่อนแล้ว นั่นทำให้เราสามารถคาดการณ์ได้ว่า

ปูนปั้นเท่านั้นได้รับการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาก่อนหน้านี้แล้วเช่นเดียวกัน ทำให้พบองค์ประกอบภายในของปูนปั้นเท่านั้นมีเกลือแคลเซียมซัลเฟต ดังสมการ 4.3



4.5 อัตราการกัดกร่อน

จากการพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ทำการศึกษากัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น ได้ศึกษาภายใต้สภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 29.5 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ (จากการตรวจวัดของเครื่องมือตรวจวัดอุตุนิยมวิทยา)

4.5.1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% Weight Loss)

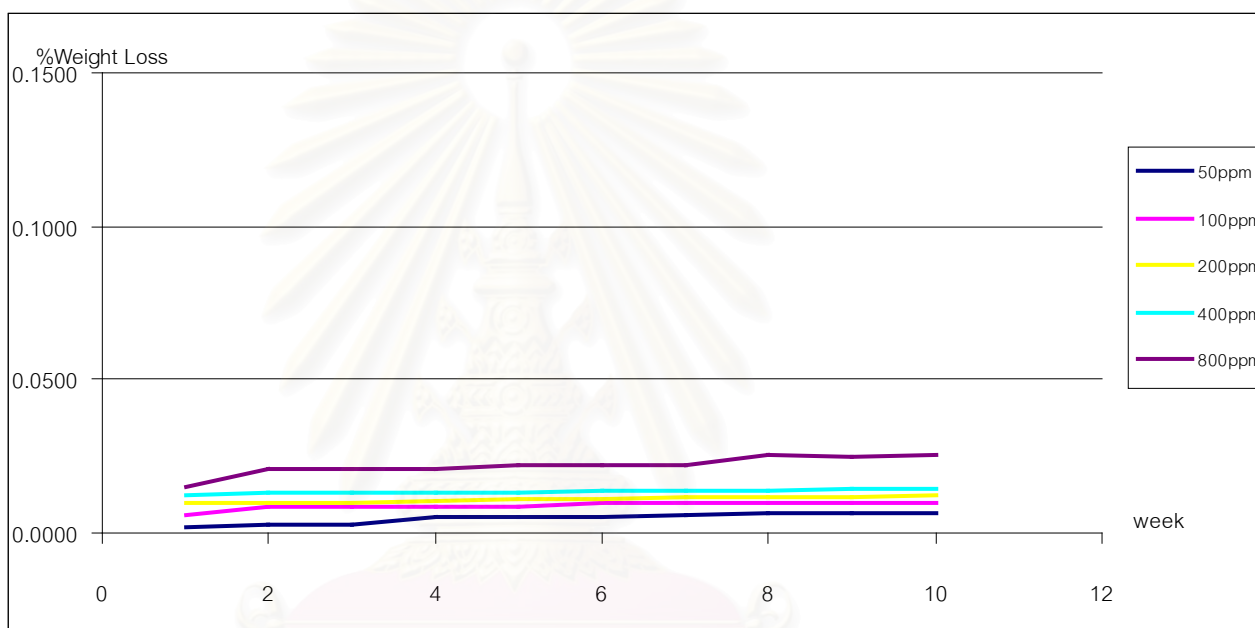
เป็นการศึกษาอัตราการกัดกร่อนจากเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุตัวอย่างที่หายไป หลังการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน ที่ระยะเวลา 1 - 10 สัปดาห์ โดยการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งอย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ของ Sartorius รุ่น BA210S ซึ่งได้ทำการแสดงผลของการชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดที่ ภาคผนวก ก. โดยได้ผลการทดลองดังนี้

1) เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐเก่า

วัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อิฐเก่า หลังจากทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน แล้วนำมาวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไปของวัสดุตัวอย่าง ในแต่ละสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การกัดกร่อนหรือเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของอิฐเก่าเกิดได้มากที่สุดเมื่อสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 800, 400, 200, 100 และ 50 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และเกิดมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

เมื่อนำตัวเลขจากผลการทดลองที่ได้นี้ มาทำการพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.18 พบว่าที่ความเข้มข้น 800 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) เท่ากับ 0.5380 ที่ความเข้มข้น 400 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.7891 ที่ความเข้มข้น 200 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8687 ที่ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8327 และที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.7402



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายกับความเข้มข้นของ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัสของอิฐเก่า

จากผลการทดลองข้างต้นนี้จะเห็นได้ว่า อิฐเก่าที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 800 ส่วนในล้านส่วน มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์ลดลงเมื่อสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 400, 200, 100 และ 50 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ นั่นคือการกัดกร่อนหรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐเก่านั้นแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือจะเกิดได้มากเมื่ออิฐเก่าสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นมาก และเกิดขึ้นได้น้อยหากสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อย นอกจากนี้การกัดกร่อนหรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไปของอิฐเก่ายังแปรผันโดยตรงกับเวลา เนื่องจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไป

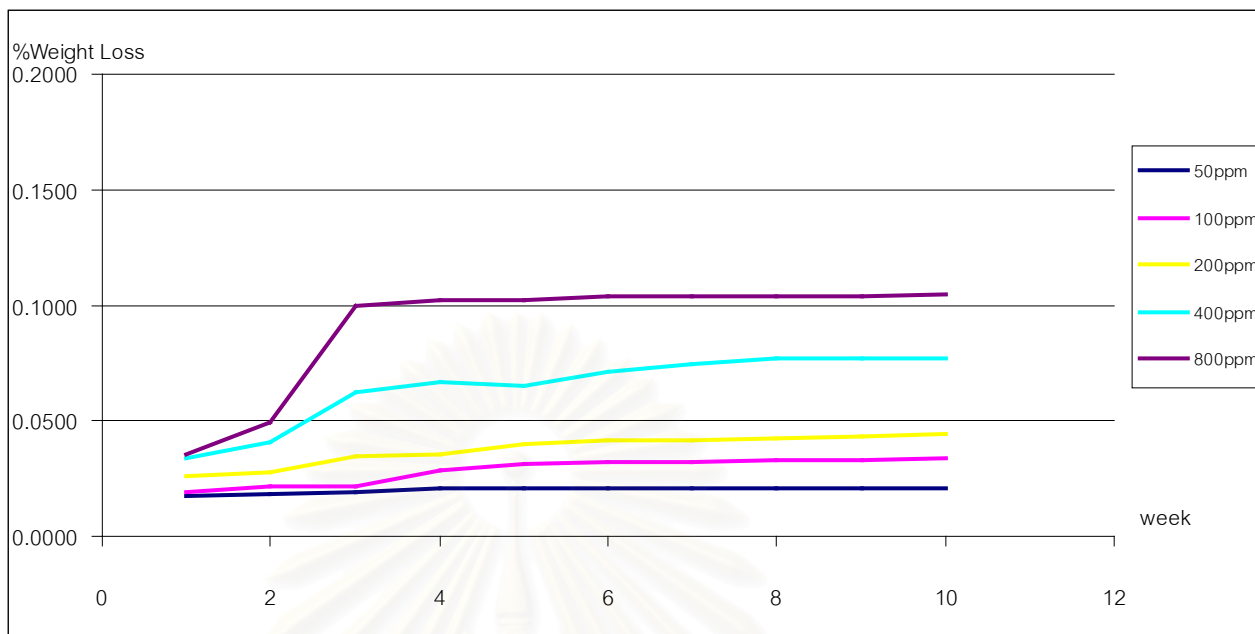
ยังพบมากขึ้นเรื่อยๆ จากสัปดาห์ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ตามลำดับ นั่นคืออิฐเก่า ยิ่งสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นเวลานานเท่าใด ก็ยิ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากขึ้นเท่านั้น

2) เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐปัจจุบัน

วัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อิฐปัจจุบัน หลังจากทำการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน แล้วนำมาวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไปของวัสดุตัวอย่าง ในแต่ละสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การกัดกร่อน หรือเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของอิฐปัจจุบันเกิดได้มากที่สุดเมื่อสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 800, 400, 200, 100 และ 50 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และจะเกิดมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

เมื่อนำตัวเลขจากผลการทดลองที่ได้นี้ มาทำการพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.19 พบว่าที่ความเข้มข้น 800 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.7991 ที่ความเข้มข้น 400 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9530 ที่ความเข้มข้น 200 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9534 ที่ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.7218 และที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8701



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายกับความเข้มข้นของ
ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัสของอิฐปัจจุบัน

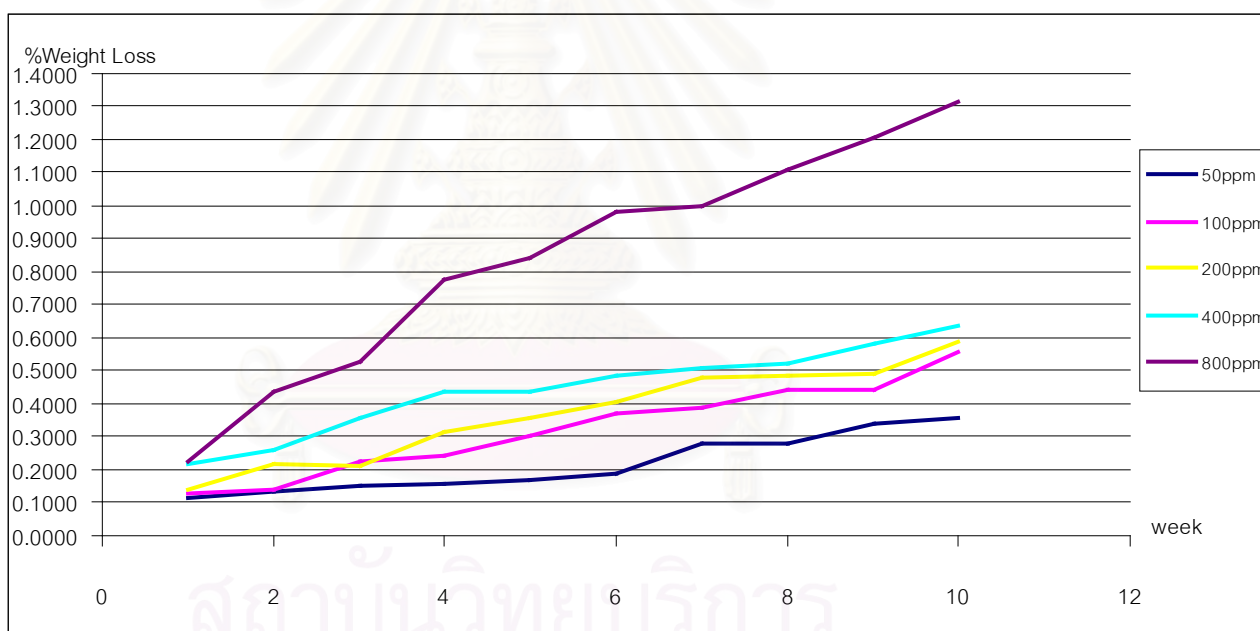
จากผลการทดลองข้างต้นเห็นได้ว่า อิฐปัจจุบันที่สัมผัสกับก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ 800 ส่วนในล้านส่วนมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากที่สุด และลดลงเมื่อสัมผัสกับก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 400, 200, 100 และ 50 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ นั่นคือการกัดกร่อนหรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐปัจจุบันนั้นแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ คือจะเกิดได้มากเมื่ออิฐปัจจุบันสัมผัสกับก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นมาก และเกิดขึ้นได้น้อยหากสัมผัสกับก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อย นอกจากนี้การกัดกร่อนหรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐปัจจุบันยังแปรผันโดยตรงกับเวลา เนื่องจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปยังพบมากขึ้นเรื่อยๆ จากสัปดาห์ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ตามลำดับ นั่นคืออิฐปัจจุบันยังสัมผัสกับก๊าซคลอรีนไดออกไซด์เป็นเวลานานเท่าใดยังมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากขึ้นเท่านั้น

3) เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปูนปั้นเก่า

วัสดุตัวอย่าง ได้แก่ ปูนปั้นเก่า หลังจากทำการสัมผัสกับก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน แล้วนำมาวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไปของวัสดุตัวอย่าง ในแต่ละสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การกักก่อน หรือเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของ ปูนปั้นเก่า เกิดได้มากที่สุดเมื่อสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 800, 400, 200, 100 และ 50 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และจะเกิดมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

เมื่อนำตัวเลขจากผลการทดลองที่ได้นี้ มาทำการพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของการกักก่อนที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.20 พบว่าที่ความเข้มข้น 800 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.9672 ที่ความเข้มข้น 400 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9503 ที่ความเข้มข้น 200 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9685 ที่ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9754 และที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9244



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายกับความเข้มข้นของ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัสของปูนปั้นเก่า

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า ปูนปั้นเก่าที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 800 ส่วนในล้านส่วนมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากที่สุด และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปจะลดลง เมื่อสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 400, 200, 100 และ 50 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

นั่นคือการกัดกร่อนหรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปูนปั้นเท่านั้น แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือการกัดกร่อนจะเกิดได้มากเมื่อปูนปั้นเก่าสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่มีความเข้มข้นมาก และเกิดขึ้นได้น้อยหากสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อย นอกจากนี้การกัดกร่อน หรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปูนปั้นโบราณยังแปรผันโดยตรงกับเวลา เนื่องจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปยังพบมากขึ้นเรื่อยๆ จากสัปดาห์ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ตามลำดับ นั่นคือปูนปั้นเก่ายิ่งสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นเวลานานเท่าใดยิ่งมีเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไปมากขึ้นเท่านั้น

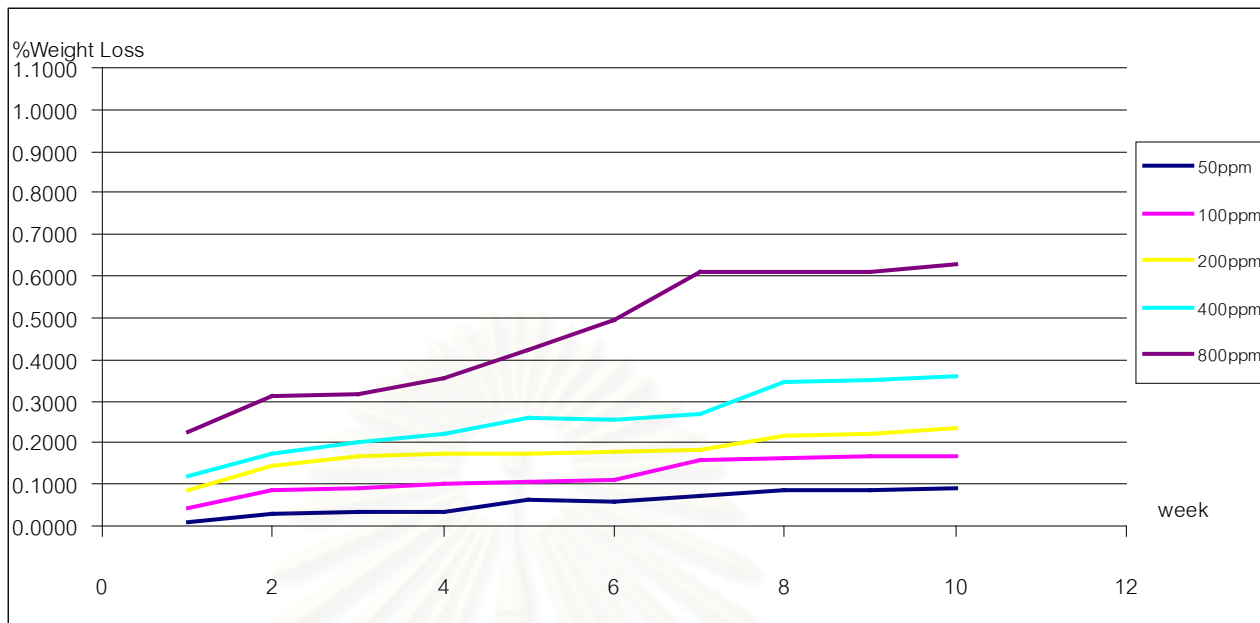
4) เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปูนปั้นปัจจุบัน

วัสดุตัวอย่าง ได้แก่ ปูนปั้นปัจจุบัน หลังจากทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ ความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน แล้วนำมาวิเคราะห์หาน้ำหนักที่ หายไปของวัสดุตัวอย่าง ในแต่ละสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การกัดกร่อน หรือเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป ของ ปูนปั้นปัจจุบันเกิดได้มากที่สุดเมื่อสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 800, 400, 200, 100 และ 50 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และจะเกิดมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสกับ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

เมื่อนำตัวเลขจากผลการทดลองที่ได้นี้ มาทำการพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ ของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.21 พบว่าที่ความเข้มข้น 800 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ เท่ากับ 0.9420 ที่ความเข้มข้น 400 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9539 ที่ความเข้มข้น 200 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8589 ที่ความ เข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9225 และที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9559

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายกับความเข้มข้นของ
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัสของปูนปั้นปัจจุบัน

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า ปูนปั้นปัจจุบันที่สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 800 ส่วนในล้านส่วน มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากที่สุด และจะลดลงเมื่อทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 400, 200, 100 และ 50 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ นั่นคือการกัดกร่อนหรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปูนปั้นปัจจุบันนั้น แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือจะเกิดได้มากเมื่อปูนปั้นปัจจุบันสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นมาก และเกิดขึ้นได้น้อยหากสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อย นอกจากนี้ การกัดกร่อนหรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปูนปั้นปัจจุบันยังแปรผันโดยตรงกับเวลาด้วย เนื่องจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปยิ่งพบมากขึ้นเรื่อยๆ จากสัปดาห์ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ตามลำดับ นั่นคือปูนปั้นปัจจุบันยังสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นเวลานานเท่าใดยังมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากขึ้นเท่านั้น

4.5.2 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิตินี้ เป็นการนำข้อมูลที่ทำกรเก็บรวบรวมมาคำนวณหาค่าทางสถิติ เพื่อนำมาใช้ทดสอบสถิติเบื้องต้น ทดสอบสมมติฐานและตอบวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้

1) ค่าเฉลี่ย

ในการหาค่าเฉลี่ย ได้ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของวัสดุ ตัวอย่าง ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน ที่เกิดขึ้นในการสัมผัสก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแต่ละความเข้มข้น (ตารางที่ 4.14) และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ที่เกิดขึ้นในการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแต่ละสัปดาห์ (ตารางที่ 4.15) ดังนี้

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป			
	อิฐเก่า	อิฐปัจจุบัน	ปูนปั้นเก่า	ปูนปั้นปัจจุบัน
50	1.9973E-02	0.4913E-02	0.2166	0.0565
100	2.8557E-02	0.8927E-02	0.3238	0.1192
200	3.7730E-02	1.0960E-02	0.3690	0.1770
400	6.4523E-02	1.3377E-02	0.4443	0.2547
800	9.0963E-02	2.2037E-02	0.8410	0.4581
ค่าเฉลี่ย	4.8349E-02	1.2047E-02	0.4389	0.2131

จากตารางที่ 4.14 ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 50 ส่วนในล้านส่วน ปูนปั้นเก่า เกิดการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงคือ ปูนปั้นปัจจุบัน, อิฐเก่า และอิฐปัจจุบัน ตามลำดับ คือมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.2166 เปอร์เซ็นต์, 5.6460×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.9973×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 0.4913×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน ปุ๋ยน้ำเกิดการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงคือ ปุ๋ยน้ำปัจจุบัน, อีซูเกา และอีซูปัจจุบัน ตามลำดับ โดยมีเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.3238 เปอร์เซ็นต์, 0.1192 เปอร์เซ็นต์, 2.8557×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 0.8927×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 200 ส่วนในล้านส่วน ปุ๋ยน้ำเกิดการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงคือ ปุ๋ยน้ำปัจจุบัน, อีซูเกา และอีซูปัจจุบัน ตามลำดับ โดยมีเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.3690 เปอร์เซ็นต์, 0.1770 เปอร์เซ็นต์, 3.7730×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 1.0960×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 400 ส่วนในล้านส่วน ปุ๋ยน้ำเกิดการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงคือ ปุ๋ยน้ำปัจจุบัน, อีซูเกา และอีซูปัจจุบัน ตามลำดับ โดยมีเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.4443 เปอร์เซ็นต์, 0.2547 เปอร์เซ็นต์, 6.4523×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 1.3377×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 800 ส่วนในล้านส่วน ปุ๋ยน้ำเกิดการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงคือ ปุ๋ยน้ำปัจจุบัน, อีซูเกา และอีซูปัจจุบัน ตามลำดับ คือมีเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.8410 เปอร์เซ็นต์, 0.4581 เปอร์เซ็นต์, 9.0963×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 2.2037×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป หลังทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้ง 5 ความเข้มข้นนั้น ปรากฏว่าปุ๋ยน้ำเกิดการกัดกร่อนมากที่สุดเช่นกัน รองลงคือ ปุ๋ยน้ำปัจจุบัน, อีซูเกา และอีซูปัจจุบัน ตามลำดับ คือมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป เท่ากับ 0.4389 เปอร์เซ็นต์, 0.2131 เปอร์เซ็นต์, 4.8349×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 1.2047×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

หลังจากทำการศึกษาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปที่เกิดขึ้น จากการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของวัสดุตัวอย่างแล้ว ได้ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไปที่เกิดขึ้นในแต่ละสัปดาห์ ของวัสดุตัวอย่างแต่ละชนิดโดยทำการเปรียบเทียบได้ แสดง ในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ที่เกิดขึ้นในแต่ละสัปดาห์ ระยะเวลา สัปดาห์ที่ 1-10

เวลาในการสัมผัส ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (สัปดาห์)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป			
	อิฐเก่า	อิฐปัจจุบัน	ปูนปั้นเก่า	ปูนปั้นปัจจุบัน
1	2.6227E-02	0.9040E-02	0.1642	9.7187E-02
2	3.1580E-02	1.0920E-02	0.2375	0.1476
3	4.7573E-02	1.1147E-02	0.2951	0.1615
4	5.0640E-02	1.1667E-02	0.3850	0.1762
5	5.2000E-02	1.2140E-02	0.4211	0.2040
6	5.3653E-02	1.2507E-02	0.4869	0.2193
7	5.4507E-02	1.2627E-02	0.5298	0.2576
8	5.5527E-02	1.3300E-02	0.5663	0.2846
9	5.5720E-02	1.3447E-02	0.6117	0.2876
10	5.6067E-02	1.3633E-02	0.6918	0.2952
เฉลี่ย	4.8349E-02	1.2043E-02	0.4389	0.2131

จากตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปในการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแต่ละสัปดาห์นั้น ทำให้ทราบว่าแนวโน้มของการกัดกร่อนมีเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาของการ สัมผัส นั่นคือ ในสัปดาห์ที่ 1 จะมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปน้อยที่สุด และจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากที่สุดในสัปดาห์ที่ 10 ดังนี้

อิฐเก่า มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเรียงลำดับจาก สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 10 คือ 2.6227×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 3.1580×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 4.7573×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 5.0640×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 5.2000×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 5.3653×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 5.4507×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 5.5527×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 5.5720×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 5.6067×10^{-2} เปอร์เซ็นต์

อิฐปัจจุบัน มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเรียงลำดับจาก สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 10 คือ 0.9040×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.0920×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.1147×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.1667×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.2140×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.2507×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.2627×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.3300×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 1.3447×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 1.3633×10^{-2} เปอร์เซ็นต์

ปูนบันเก่า มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเรียงลำดับจาก สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 10 คือ 0.1642 เปอร์เซ็นต์, 0.2375 เปอร์เซ็นต์, 0.2951 เปอร์เซ็นต์, 0.3850 เปอร์เซ็นต์, 0.4211 เปอร์เซ็นต์, 0.4869 เปอร์เซ็นต์, 0.5298 เปอร์เซ็นต์, 0.5663 เปอร์เซ็นต์, 0.6117 เปอร์เซ็นต์ และ 0.6918 เปอร์เซ็นต์

ปูนบันปัจจุบัน มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเรียงลำดับจาก สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 10 คือ 9.7187×10^{-2} เปอร์เซ็นต์, 0.1476 เปอร์เซ็นต์, 0.1615 เปอร์เซ็นต์, 0.1762 เปอร์เซ็นต์, 0.2040 เปอร์เซ็นต์, 0.2193 เปอร์เซ็นต์, 0.2576 เปอร์เซ็นต์, 0.2846 เปอร์เซ็นต์, 0.2876 เปอร์เซ็นต์ และ 0.2952 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองข้างต้นนี้ สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป หลังการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้ง 10 สัปดาห์ ปรากฏว่าปูนบันเก่าเกิดการกัดกร่อนมากที่สุดเช่นกัน รองลงคือ ปูนบันปัจจุบัน, อิฐเก่า และอิฐปัจจุบัน ตามลำดับ คือมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.4389 เปอร์เซ็นต์, 0.2131 เปอร์เซ็นต์, 4.8349×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 1.2047×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2) การวิเคราะห์การถดถอย

ในทางสถิติการพยากรณ์ตัวแปรตามนั้น ในการที่นำตัวแปรอิสระตัวเดียวมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงมากมาพยากรณ์ อาจจะได้สมการถดถอยที่เหมาะสม และพยากรณ์ได้ถูกต้อง และใกล้เคียงดีกว่าการใช้ตัวแปรอิสระหลายๆ ตัวแปร และหากสมการถดถอยที่ได้มาส่วนใหญ่มักจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) แต่ถ้าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปแบบอื่นที่ไม่ใช่เส้นตรงการใช้รูปแบบของสมการเชิงเส้นตรงไปพยากรณ์ ก็จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบตัวแบบระหว่างรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง กับความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithmic) ในการวิเคราะห์ตัวแบบที่เหมาะสม เพื่อหาสมการถดถอยที่เหมาะสมต่อไป ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าทางสถิติเปรียบเทียบตัวแบบในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตัวแปรตาม	ตัวแปรอิสระ	ตัวแบบ	R square
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป	ความเข้มข้น SO ₂	Linear	0.762
		Logarithmic	0.731
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป	เวลา	Linear	0.840
		Logarithmic	0.701

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R square) เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่อยู่ในแต่ละตัวแบบ โดยที่ตัวแบบใดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงตัวแบบนั้นสามารถที่จะใช้พยากรณ์ได้ดี ซึ่งจากตารางที่ 4.16 ผลปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของตัวแบบในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า ทั้งความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือมีค่า 0.762 และความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับเวลาในการสัมผัส คือมีค่า 0.840 อีกทั้งในการวิจัยนี้ยังต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม คือเปอร์เซ็นต์อัตราการกัดกร่อน กับตัวแปรอิสระหลายตัวแปร คือความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์และเวลาในการสัมผัส ดังนั้นในการวิเคราะห์หาสมการถดถอยจึงสมควรที่จะใช้ตัวแบบสมการเส้นตรงมาใช้ในการพยากรณ์

หลังจากทำการวิเคราะห์ความถดถอยในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบพหุคูณ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 11.0 แล้ว ได้สรุปค่าทางสถิติที่วิเคราะห์ได้ ของวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ค่าทางสถิติของวัสดุตัวอย่าง

วัสดุตัวอย่าง	R	R Square	std. Error of the Estimate	sig.
อิฐเก่า	0.920	0.846	1.16592E-02	0.000
อิฐปัจจุบัน	0.863	0.745	3.39551E-03	0.000
ปูนปั้นเก่า	0.829	0.788	0.180265	0.000
ปูนปั้นปัจจุบัน	0.937	0.877	5.74250E-02	0.000

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์พหุคูณ (R) เป็นค่าที่แสดงระดับความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรอิสระทุกตัว ได้แก่ ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และเวลาในการสัมผัส กับตัวแปรตาม คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์พหุคูณเข้าใกล้ 1 นั่นคือ อิฐเก่ามีค่า 0.920 อิฐปัจจุบันมีค่า 0.863 ปูนปั้นเก่ามีค่า 0.829 และปูนปั้นปัจจุบันมีค่า 0.937 นั้นหมายความว่าในวัสดุตัวอย่างแต่ละชนิดตัวแปรต่างๆ มีความสัมพันธ์กันสูง ซึ่งแสดงว่าสามารถใช้ตัวแปรอิสระทั้งหมดมาพยากรณ์ตัวแปรตามคือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปได้

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) เป็นค่าที่แสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระทั้งหมดที่มีต่อตัวแปรตาม จากผลการวิเคราะห์ในอิฐูเก๋ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.846 แสดงว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามคือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปถึง 84.60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 16.40 เปอร์เซ็นต์ เป็นอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ในตัวแบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดสามารถทำนายเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐูเก๋ได้ถึง 84.60 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนข้อมูลแต่ละประเภทที่ใช้ในการทดสอบ ส่วนอิฐูปัจจุบันมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.745 นั่นคือตัวแปรอิสระทั้งหมดสามารถทำนายเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐูเก๋ได้ 74.50 เปอร์เซ็นต์ ในปูนปั้นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.788 นั่นคือตัวแปรอิสระทั้งหมดสามารถทำนายเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐูเก๋ได้ 78.80 เปอร์เซ็นต์ และในการวิเคราะห์ปูนปั้นปัจจุบันมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.877 นั่นคือตัวแปรอิสระทั้งหมดสามารถทำนายเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐูเก๋ได้ 87.70 เปอร์เซ็นต์

ค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ (std. Error of the Estimate) คือค่าที่แสดงระดับของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้ตัวแปรอิสระทั้งหมดมาพยากรณ์ตัวแปรตาม จากการวิเคราะห์ที่ได้นี้ อาจกล่าวได้ว่า การพยากรณ์เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐูเก๋จะมีความคลาดเคลื่อน หรือความผิดพลาดประมาณ 1.16592×10^{-2} การพยากรณ์เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของอิฐูปัจจุบันจะมีความคลาดเคลื่อน หรือความผิดพลาดประมาณ 3.39551×10^{-3} การพยากรณ์เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปูนปั้นจะมีความคลาดเคลื่อน หรือความผิดพลาดประมาณ 0.180265 และการพยากรณ์เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของปูนปั้นปัจจุบันจะมีความคลาดเคลื่อน หรือความผิดพลาด ประมาณ 5.74250×10^{-2}

ค่าระดับนัยสำคัญ (sig.) เป็นค่าที่ใช้ในการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระที่มีอยู่ในตัวแบบสามารถใช้ได้ในทุกตัวแปรหรือไม่ภายใต้สมมติฐานทางสถิติดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่สามารถใช้พยากรณ์ได้

H_1 : ตัวแปรอิสระสามารถใช้พยากรณ์ได้

ซึ่งค่าความน่าจะเป็นของระดับนัยสำคัญที่คำนวณได้ ของวัสดุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด คือ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ที่กำหนดคือ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 จึงสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระในตัวแบบสามารถใช้พยากรณ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ค่าสถิติที่ทำการวิเคราะห์ในขั้นต่อมาได้ทำการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อหาสมการถดถอย ในการพยากรณ์อัตราการกัดกร่อน ดังนี้

(1) อีฐู่เก่า

เมื่อนำค่าความน่าจะเป็นของระดับนัยสำคัญ โดยกำหนดค่า $\alpha = 0.05$ ของแต่ละตัวแปร มาทำการวิเคราะห์ว่าตัวแปรใดที่สามารถนำมาใช้พยากรณ์ได้ พบว่าตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัส มีค่า 0.000 (ตารางที่ 4.18) ทั้ง 2 ตัวแปร ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ค่า α ที่กำหนด จึงสรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถนำ ตัวแปรอิสระ ทั้ง 2 ค่านี้ไปใช้พยากรณ์อัตราการกัดกร่อนได้

ตารางที่ 4.18 ค่าการถดถอยของอีฐู่เก่า

	B	std.Error	sig.
Constant	2.798E-03	0.002	0.230
Concentration SO ₂ (ppm)	9.419E-05	0.000	0.000
Time (week)	2.973E-03	0.000	0.000

ดังนั้นจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ที่คำนวณได้นี้ สามารถนำมาสร้างสมการได้ดังนี้

$$\hat{y} = (2.798 \times 10^{-3}) + [(9.419 \times 10^{-5}) \text{ Concentration SO}_2] + [(2.973 \times 10^{-3}) \text{ Time}]$$

ค่าประมาณของค่าความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์การถดถอย สำหรับตัวแปร ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัส เท่ากับ 0.00 เปอร์เซ็นต์

(2) อีฐู่ปัจจุบัน

สำหรับอีฐู่ปัจจุบัน จากตารางที่ 4.19 ค่าความน่าจะเป็นของระดับ นัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ทั้ง 2 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการ สัมผัส มีค่าน้อยกว่าค่า α ที่กำหนด คือมีค่า 0.000 จึงสามารถสรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถนำตัวแปร อิสระทั้ง 2 ค่านี้ไปใช้พยากรณ์อัตราการกัดกร่อนได้

ตารางที่ 4.19 ค่าการถดถอยของอิฐปัจจุบัน

	B	std.Error	sig.
Constant	3.238E-03	0.001	0.000
Concentration SO ₂ (ppm)	2.055E-05	0.000	0.000
Time (week)	4.427E-04	0.000	0.000

ดังนั้นจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ที่คำนวณ
ได้นี้ สามารถนำมาสร้างสมการได้ดังนี้

$$\hat{y} = (3.238 \times 10^{-3}) + [(2.055 \times 10^{-5}) \text{ Concentration SO}_2] + [(4.427 \times 10^{-4}) \text{ Time}]$$

ค่าประมาณของค่าความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์การถดถอย สำหรับ
ตัวแปร ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัส เท่ากับ 0.00 เปอร์เซ็นต์

(3) ปูนปั้นเก่า

สำหรับปูนปั้นเก่า จากตารางที่ 4.20 ค่าความน่าจะเป็นของระดับนัย สำคัญ
 $\alpha = 0.05$ ทั้ง 2 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัส
มีค่าน้อยกว่าค่า α ที่กำหนด คือมีค่า 0.000 จึงสามารถสรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถ
นำตัวแปรอิสระทั้ง 2 ค่านี้ไปใช้พยากรณ์อัตราการกัดกร่อนได้

ตารางที่ 4.20 ค่าการถดถอยของปูนปั้นเก่า

	B	std.Error	sig.
Constant	-1.080E-02	0.036	0.003
Concentration SO ₂ (ppm)	7.720E-04	0.000	0.000
Time (week)	5.590E-02	0.005	0.000

ดังนั้นจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ที่คำนวณ
ได้นี้ สามารถนำมาสร้างสมการได้ดังนี้

$$\hat{y} = (-1.080 \times 10^{-2}) + [(7.720 \times 10^{-4}) \text{ Concentration SO}_2] + [(5.590 \times 10^{-2}) \text{ Time}]$$

ค่าประมาณของค่าความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์การถดถอย สำหรับ ตัวแปร ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัส เท่ากับ 0.00 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

(4) ปูเน่ปัจจุบัน

ค่าการวิเคราะห์สำหรับปูเน่เก่า จากตาราง 4.21 ค่าความน่าจะเป็นของระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ทั้ง 2 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัส มีค่าน้อยกว่าค่า α ที่กำหนด คือมีค่า 0.000 และ 0.002 ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถนำตัวแปรอิสระทั้ง 2 ค่านี้ไปใช้ในการพยากรณ์อัตราการกัดกร่อนได้

ตารางที่ 4.21 ค่าการถดถอยของปูเน่ปัจจุบัน

	B	std.Error	sig.
Constant	-6.501E-03	0.011	0.000
Concentration SO ₂ (ppm)	5.059E-04	0.000	0.000
Time (week)	2.205E-02	0.002	0.000

ดังนั้นจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ที่คำนวณได้นี้ สามารถนำมาสร้างสมการได้ดังนี้

$$\hat{y} = (-6.501 \times 10^{-3}) + [(5.059 \times 10^{-4}) \text{ Concentration SO}_2] + [(2.205 \times 10^{-2}) \text{ Time}]$$

ค่าประมาณของค่าความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์การถดถอย สำหรับ ตัวแปร ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเวลาในการสัมผัส เท่ากับ 0.00 และ 0.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4.5.3 อัตราการกัดกร่อน

จากการคำนวณค่าทางสถิติข้างต้น ทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุชนิดต่างๆ เป็นเปอร์เซ็นต์ โดยสมการที่ได้นี้เป็นสมการซึ่งคำนวณภายใต้สมมติฐานจากการให้วัสดุรูปลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน ในสภาวะบรรยากาศทั่วไป คือที่ อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

1) อีซูเก่า

$$C.T. = (2.798 \times 10^{-3}) + [(9.419 \times 10^{-5}) C] + [(2.973 \times 10^{-3}) T] \dots(4.4)$$

เมื่อ C.T. = อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซ็นต์
 C = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน
 T = เวลา, สัปดาห์

2) อีซูปัจจุบัน

$$C.T. = (3.238 \times 10^{-3}) + [(2.055 \times 10^{-5}) C] + [(4.427 \times 10^{-4}) T] \dots(4.5)$$

เมื่อ C.T. = อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซ็นต์
 C = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน
 T = เวลา, สัปดาห์

3) ปูนปั้นเก่า

$$C.T. = (-1.080 \times 10^{-2}) + [(7.720 \times 10^{-4}) C] + [(5.590 \times 10^{-2}) T] \dots(4.6)$$

เมื่อ C.T. = อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซ็นต์
 C = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน
 T = เวลา, สัปดาห์

4) ปูนปั้นปัจจุบัน

$$C.T. = (-6.501 \times 10^{-3}) + [(5.059 \times 10^{-4}) C] + [(2.205 \times 10^{-2}) T] \dots (4.7)$$

- เมื่อ C.T. = อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซนต์
 C = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน
 T = เวลา, สัปดาห์

จากสมการที่ได้นี้เป็นสมการที่สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น โดยทำให้ค่าการณได้ถึงการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นเมื่อวัสดุ ซึ่งได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน มีการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ และระยะเวลาต่างๆ กัน โดยอยู่ในรูปของเปอร์เซนต์ของอัตราการกัดกร่อน ดังนั้นจากสมการที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาการกัดกร่อน ในรูปของการกัดกร่อนพื้นที่ผิวของวัสดุ หรือความลึกของการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นหากวัสดุ สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้ดังนี้ (แสดงวิธีคิดในภาคผนวก ค)

$$D.C. = \frac{V_{(วัสดุ)} \times C.T_{(A.E)}}{A.E. \times 100} \dots (4.8)$$

- เมื่อ D.C. คือ ความลึกของการกัดกร่อน, เซนติเมตร
 A.E. คือ พื้นที่ผิวที่สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ตารางเซนติเมตร
 $V_{(วัสดุ)}$ คือ ปริมาตรของวัสดุ, ลูกบาศก์เซนติเมตร
 C.T._(A.E) คือ เปอร์เซนต์อัตราการกัดกร่อนเทียบกับพื้นที่สัมผัส A.E., เปอร์เซนต์

$$\text{โดยคำนวณจาก } C.T_{(A.E)} = \frac{C.T. \times A.E.}{31.25 \times 100}$$

C.T. คือ อัตราการกัดกร่อนเดิม, เปอร์เซนต์

4.6 การประยุกต์ใช้อัตราการกักกร่อน

จากสมการอัตราการกักกร่อนที่คำนวณได้นำมาทำการศึกษาต่อ เพื่อทำนายหรือพยากรณ์ ผลการกักกร่อนที่อาจเกิดขึ้นต่อโบราณสถาน เพื่อการเฝ้าระวังและป้องกันที่เหมาะสมต่อไป โดย ทั้งนี้เป็นสมการอัตราการกักกร่อนที่อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ให้วัสดุรูปลูกบาศก์ ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสภาวะบรรยากาศทั่วไป คือที่อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น $50 - 800$ ส่วนในล้านส่วน ในระบบปิด

4.6.1 ทำนายค่าการกักกร่อนจากการจัดกิจกรรมวันอนุรักษ์มรดกโลก

จากที่ได้ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ในงานอนุรักษ์มรดกโลก พบว่าการจัดกิจกรรมดังกล่าวเป็นการเพิ่มการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโบราณสถาน โดย ระยะเวลาการจัดงานทั้งสิ้นเป็นเวลา 9 วัน โดยมีค่าการตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เฉลี่ย เท่ากับ 9.7577 ส่วนในพันล้านส่วน จากข้อมูลนี้สามารถนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การ กักกร่อนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว ได้ผลการคำนวณ (แสดงการคำนวณใน ภาคผนวก ค.) ดังนี้

โบราณสถานในบริเวณวัดพระราม ในช่วงของการจัดงาน 9 วัน เกิดการกักกร่อนโดย พิจารณาจากน้ำหนักที่หายไปเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุตัวอย่าง ในส่วนวัสดุชนิดอิฐเก่า จะ เกิดการกักกร่อนไป 6.6210×10^{-3} เปอร์เซ็นต์ หากเป็นวัสดุชนิดปูนปั้นเก่า จะเกิดการกักกร่อน 6.1078×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากโบราณสถานในบริเวณวัดพระรามในปัจจุบันนี้ได้รับการ บูรณะโดยใช้วัสดุที่ทำการผลิตขึ้นมาใหม่ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณการกักกร่อนในส่วนวัสดุชนิดอิฐ ปัจจุบันได้ 3.8070×10^{-3} เปอร์เซ็นต์ และวัสดุชนิดปูนปั้นปัจจุบันจะเกิดการกักกร่อน 2.1854×10^{-2} เปอร์เซ็นต์

จากผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การกักกร่อนที่ได้นี้ ได้ทำการคำนวณการกักกร่อนในรูปของ ความลึกของพื้นที่ผิวของวัสดุที่ถูกการกักกร่อนไป (แสดงการคำนวณใน ภาคผนวก ค.) โดยสมมติให้ วัสดุของโบราณสถานเป็นรูปลูกบาศก์ ขนาด $10 \times 10 \times 10$ เมตร โดยมีพื้นที่ผิวของวัสดุสัมผัสกับ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เท่ากับ 100 ตารางเมตร ดังนั้นวัสดุชนิดอิฐเก่า พื้นผิวจะถูกกักกร่อนลึกลง ไป 2.1188×10^{-3} เซนติเมตร วัสดุชนิดอิฐปัจจุบัน พื้นผิวจะถูกกักกร่อน ลึกลงไป 1.2184×10^{-3} เซนติเมตร วัสดุชนิดปูนปั้นเก่า บริเวณพื้นผิวจะถูกกักกร่อนลึกลงไป 1.9554×10^{-2} เซนติเมตร วัสดุ ชนิดปูนปั้นปัจจุบัน พื้นผิวจะถูกกักกร่อนลึกลงไป 6.9933×10^{-3} เซนติเมตร

นอกจากนี้ หากนำค่าจากการตรวจวัดโดยกรมควบคุมมลพิษของช่วงเวลาเดียวกันกับการจัดงานอยุธยาอมรตกลก ซึ่งเป็นค่าที่ตรวจวัดในสภาพบรรยากาศทั่วไปของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่วัดได้เฉลี่ย 9 วัน ได้ 2.9 ส่วนในพันล้านส่วน เมื่อนำมาคำนวณในสมการอัตราจำกัดก่อนที่คำนวณได้นี้ ทำให้ทราบว่าหากไม่มีการจัดงานดังกล่าว โบราณสถานบริเวณวัดพระราม จะเกิดการกัดกร่อนในวัสดุชนิดอิฐเก่าเป็น 6.6210×10^{-3} เปอร์เซ็นต์ อิฐปัจจุบันเป็น 3.8070×10^{-3} เปอร์เซ็นต์ ปูนปั้นเก่าเป็น 6.1074×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และในวัสดุชนิดปูนปั้นปัจจุบัน 2.1850×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ หากพื้นที่ผิวของวัสดุที่มีการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เท่ากับ 100 ตารางเมตร วัสดุชนิดอิฐเก่า พื้นผิวจะถูกกัดกร่อนลึกลงไป 2.1186×10^{-3} เซนติเมตร วัสดุชนิดอิฐปัจจุบัน พื้นผิวจะถูกกัดกร่อนลึกลงไป 1.2183×10^{-3} เซนติเมตร วัสดุชนิดปูนปั้นเก่า พื้นผิวจะถูกกัดกร่อนลึกลงไป 1.9544×10^{-2} เซนติเมตร วัสดุชนิดปูนปั้นปัจจุบัน พื้นผิวจะถูกกัดกร่อนลึกลงไป 6.9921×10^{-3} เซนติเมตร

จากผลการคำนวณที่ได้ข้างต้นนี้ ได้นำมาเปรียบเทียบผลการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มมากขึ้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนและความลึกของการกัดกร่อน ระหว่างบริเวณพื้นที่จัดงานอยุธยาอมรตกลก กับบริเวณพื้นที่ทั่วไป

วัสดุตัวอย่าง	อัตราการกัดกร่อน (เปอร์เซ็นต์)		ความลึกของการกัดกร่อน (เซนติเมตร)	
	พื้นที่ทั่วไป	งานมรดกโลก	พื้นที่ทั่วไป	งานมรดกโลก
อิฐเก่า	6.6210E-03	6.6210E-03	2.1186E-3	2.1188E-3
อิฐปัจจุบัน	3.8070E-03	3.8070E-03	1.2183E-3	1.2184E-3
ปูนปั้นเก่า	6.1074E-02	6.1078E-02	1.9544E-2	1.9554E-2
ปูนปั้นปัจจุบัน	2.1850E-02	2.1854E-02	6.9921E-3	6.9933E-3

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

จากตารางทำให้ทราบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นด้วย

4.6.2 ทำนายค่าการกัดกร่อนจากสภาพทั่วไปของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ ปี พ.ศ.2547 ได้ทำการตรวจวัดสภาพอากาศของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยค่าเฉลี่ยรายปีของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 4.0 ส่วนในพันล้านส่วน ซึ่งจากค่าที่ได้ี้หมายความว่าในปี พ.ศ. 2547 โบราณสถานนั้นจะต้องสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ยวันละ 4.0 ส่วนในพันล้านส่วน ดังนั้นจากข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2547 ภายใต้สมมติฐานที่ให้วัสดุรูปลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสภาวะบรรยากาศสภาพทั่วไป คืออุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ผลการคำนวณ ดังนี้

โบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ได้รับการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ย 4.0 ส่วนในพันล้านส่วน ตลอดปี พ.ศ. 2547 เกิดการกัดกร่อนโดยพิจารณาจากน้ำหนักที่หายไปเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุตัวอย่าง ในส่วนวัสดุชนิดอิฐเก่า จะเกิดการกัดกร่อน 0.1578 เปอร์เซ็นต์ หากเป็นวัสดุชนิดอิฐปัจจุบัน จะเกิดการกัดกร่อน 0.0263 เปอร์เซ็นต์ วัสดุชนิดปูนปั้นเก่า เกิดการกัดกร่อน 2.9040 เปอร์เซ็นต์ และวัสดุชนิดปูนปั้นปัจจุบันจะเกิดการกัดกร่อน 1.1433 เปอร์เซ็นต์

จากผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การกัดกร่อนที่ได้ี้ เมื่อทำการประยุกต์หาการกัดกร่อนในรูปของความลึกของพื้นที่ผิวของวัสดุที่ถูกการกัดกร่อนไป นั่นคือหากสมมติให้โบราณสถานเป็นรูปลูกบาศก์ ขนาด $10 \times 10 \times 10$ เมตร โดยมีพื้นที่ผิวของวัสดุสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เท่ากับ 100 ตารางเมตร ดังนั้นวัสดุชนิดอิฐเก่า พื้นผิวจะถูกกัดกร่อนลึกลงไป 5.0502×10^{-2} เซนติเมตร วัสดุชนิดอิฐปัจจุบัน พื้นผิวจะถูกกัดกร่อนลึกลงไป 0.8423×10^{-2} เซนติเมตร วัสดุชนิดปูนปั้นเก่า พื้นผิวจะถูกกัดกร่อนลึกลงไป 9.2928×10^{-1} เซนติเมตร วัสดุชนิดปูนปั้นปัจจุบัน พื้นผิวจะถูกกัดกร่อนลึก ลงไป 3.6584×10^{-1} เซนติเมตร

4.6.3 ประยุกต์ใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองจากการประเมินผลปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ISCST3 (เทียมดารา, 2546) บริเวณตลาดเจ้าพรหม เกาะเมืองจังหวัดพระนครศรีอยุธยา อันเป็นที่ตั้งของแหล่งโบราณสถานและแหล่งชุมชน ซึ่งครอบคลุมถึงโบราณสถานบริเวณวัดพระราม

โดยมีความเข้มข้นระดับพื้นดินอยู่ในช่วง 0.1-0.29 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นจากข้อมูลนี้สามารถนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกักต่อนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ ในกรณีที่มีความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์คงที่ โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดมากที่สุดคือ 0.29 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เพื่อการทำนาย หรือการคาดคะเน การกักต่อนที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต จะได้ผลการคำนวณสรุปดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 เปอร์เซนต์การกักต่อนที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในช่วงเวลาต่างๆ ของวัสดุตัวอย่าง

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

หมายเหตุ : T.D. หมายถึง วัสดุเกิดการกักต่อนหมด อันเนื่องมาจากการเกิดเกลือและการแตก

** ภายใต้สมมติฐานจากการให้วัสดุรูปลูกบาศก์ขนาด 2.5 x 2.5 x 2.5 เซนติเมตรเมตร สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้น 50-800 ส่วนในล้านส่วน ในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์

จากตารางหากจังหวัดพระนครศรีอยุธยามีกิจกรรม และการใช้ประโยชน์พื้นที่ของจังหวัด ดังเช่นปัจจุบันนี้ โบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาจะได้รับการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณนี้ไปเรื่อยๆ ดังนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปเรื่อยๆ คือ 1 ปี, 5 ปี, 10 ปี, 50 ปี และ 100 ปี โบราณสถานจะมีเปอร์เซ็นต์การกักต่อนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนี้

ภายใต้สมมติฐานจากการให้วัสดุรูปลูกบาศก์ขนาด 2.5 x 2.5 x 2.5 เซนติเมตร สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสภาวะบรรยากาศทั่วไป ที่อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของวัสดุชนิดอิฐเก่า ในปีที่ 1, 5, 10, 50 และ 100 จะเกิดการกักต่อน 0.1578 เปอร์เซ็นต์, 0.7779 เปอร์เซ็นต์, 1.5530 เปอร์เซ็นต์, 7.7538 เปอร์เซ็นต์ และ 15.5049 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หากเป็นวัสดุชนิดอิฐปัจจุบันจะเกิดการกักต่อน 0.0263

เปอร์เซ็นต์, 0.1187 เปอร์เซ็นต์, 0.2341 เปอร์เซ็นต์, 1.1574 เปอร์เซ็นต์ และ 2.3116 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ วัสดุชนิด ปูนปั้นเก่าเกิดการกัดกร่อน 2.9040 เปอร์เซ็นต์, 14.5632 เปอร์เซ็นต์, 29.1371 เปอร์เซ็นต์ ในปีที่ 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ส่วนปีที่ 50 และ 100 มีการกัดกร่อนหมด ชั้นวัสดุ และในวัสดุชนิดปูนปั้นปัจจุบันจะเกิด การกัดกร่อน 1.1433 เปอร์เซ็นต์, 5.7423 เปอร์เซ็นต์, 11.4911 เปอร์เซ็นต์, 57.4811 เปอร์เซ็นต์ และ ปีที่ 100 เกิดการกัดกร่อนหมด

ดังนั้นจากตาราง 4.23 จากการคำนวณโดยประยุกต์ใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ISCST3 นี้จะเห็นว่า ในวัสดุประเภทปูนปั้นเก่าเมื่อได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 50 ปี และ 100 ปี และปูนปั้นปัจจุบันเมื่อได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 100 ปี จะมีการกัดกร่อนหมด ดังนั้นจึงทำการคำนวณเพื่อหาระยะเวลาที่วัสดุรูปลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร มีการกัดกร่อนหมด ซึ่งสรุปได้ว่าในวัสดุประเภทปูนปั้นหากสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จนเกิดการกัดกร่อนขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ หรือเกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือเนื้อวัสดุ ตั้งแต่ปีที่ 35 ส่วนวัสดุประเภทปูนปั้นปัจจุบัน จะเกิดการกัดกร่อน 100 เปอร์เซ็นต์ ในปีที่ 87 ในส่วนของวัสดุ ประเภทอิฐเก่า และอิฐปัจจุบันนั้น จะเกิดการกัดกร่อน 100 เปอร์เซ็นต์ หรือกัดกร่อนจนหมดจะใช้ ระยะเวลา 646 ปี และ 4332 ปี ตามลำดับ

โดยทั้งนี้ ผลการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณการกัดกร่อนซึ่งเกิดขึ้นจากการสัมผัส ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้การศึกษากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ตลอดจนการศึกษากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของวัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อีซูเกา, อีซูปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งได้ทำการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 การพัฒนาวิธีการศึกษากัดกร่อน

วิธีการที่ทำการพัฒนาเพื่อศึกษากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ที่อาจเกิดขึ้นได้นั้น สามารถนำมาใช้ในการศึกษากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนได้ดี โดยจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะต้องมีความเข้มข้นระหว่าง 50 ถึง 800 ส่วนในล้านส่วน
- 2) การทดลองเป็นระบบปิด เพื่อสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ง่าย โดยในการวิจัยครั้งนี้ ได้วิจัยภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์

โดยสามารถสรุปเป็นข้อดี และข้อเสีย ของวิธีการที่ทำการพัฒนา ได้ดังนี้

ข้อดี

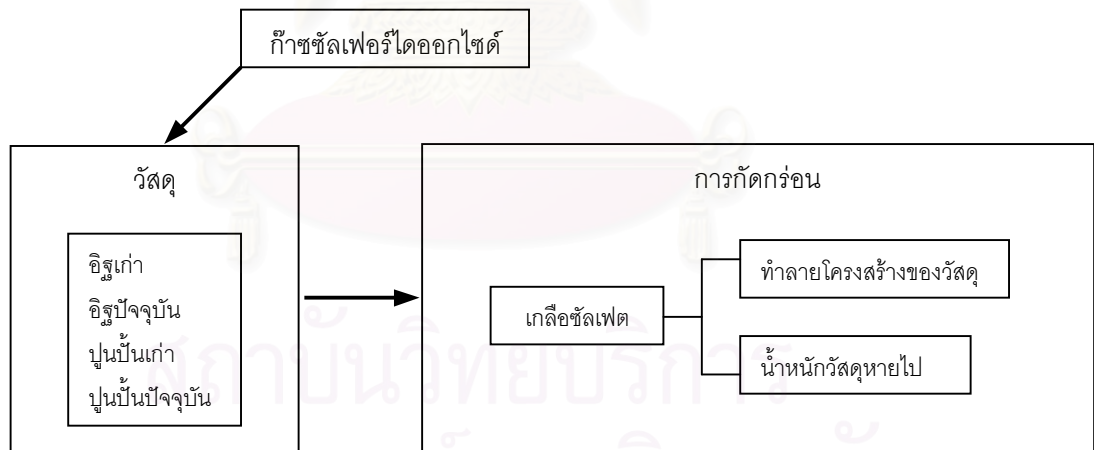
- 1) ชุดเครื่องมือที่ทำการพัฒนานั้น ได้พัฒนามาจากอุปกรณ์พื้นฐานในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ จึงทำให้จัดหาได้ง่าย และราคาไม่แพง
- 2) การเตรียมการทดลองไม่ซับซ้อน จึงสามารถทำได้ง่าย

ข้อเสีย

- 1) ไม่สามารถตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ตลอดการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือตรวจวัดก๊าซ จึงไม่สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องทดสอบได้
- 2) ไม่สามารถควบคุมความชื้นให้คงที่ตลอดการทดลองได้ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือตรวจวัดความชื้นภายในห้องทดสอบ และอุปกรณ์ในการควบคุมความชื้นภายในห้องทดสอบให้คงที่

5.1.2 การกักกร่อนที่เกิดขึ้น

จากการวิจัยเมื่อทำการศึกษาการกักกร่อนของวัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อีฐเก่า, อีฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน เมื่อสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าการกักกร่อนที่เกิดขึ้นสามารถศึกษาได้ใน 2 ลักษณะ คือ ศึกษาการทำลายโครงสร้างของวัสดุตัวอย่าง เพื่อสามารถอธิบายถึงการกักกร่อนที่เกิดขึ้น ตลอดจนสาเหตุที่นำหน้าของวัสดุหายไป และศึกษาน้ำหนักที่หายไปของวัสดุตัวอย่าง เพื่อการคำนวณหาสมการอัตราการกักกร่อน เพื่อคาดการณ์การกักกร่อนที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต



รูปที่ 5.1 แผนผังกระบวนการการกักกร่อน

1) การทำลายโครงสร้างวัสดุ

สาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การกักกร่อนของวัสดุนั้น เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไอน้ำในอากาศกลายเป็นกรดซัลฟูริก หรือเกิดจากการที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ที่ถูกปลดปล่อยออกมาสู่อากาศเกิดการตกสะสมบนพื้นผิวของวัสดุ เมื่อบรรยากาศมีความชื้นหรือเนื้อวัสดุเกิดความชื้นขึ้นจึงทำให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สะสมอยู่บนวัสดุ และแทรกอยู่ตามรูพรุนของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นกรดซัลฟูริก ซึ่งเมื่อกรดซัลฟูริกทำปฏิกิริยากับวัสดุก็จะกลายเป็นเกลือซัลเฟต ซึ่งเกลือซัลเฟตเป็นเกลือชนิดที่ละลายน้ำได้ดี ทำให้ไวต่อปฏิกิริยาหรือพร้อมที่จะทำปฏิกิริยาอยู่ตลอดเวลาหากมีน้ำหรือความชื้นร่วมอยู่ด้วย การที่เกลือแทรกซึมเข้าไปสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ หรือรูพรุนของเนื้อวัสดุโดยมีน้ำเป็นตัวนำพา น้ำที่มีอยู่ในวัสดุจะเกิดการระเหยตรงผิวนอกสุดของวัสดุ เมื่อน้ำที่ผิวนอกสุดระเหยออกไปน้ำจากส่วนที่อยู่ถัดเข้าไปข้างในก็จะเคลื่อนตัวมาแทนที่น้ำดังกล่าวซึ่งจะพาเกลือซัลเฟตที่ละลายน้ำมาด้วย เมื่อน้ำระเหยไปเกลือระเหยไม่ได้จึงมีความเข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับหนึ่งเป็นจุดอิ่มตัวของสารละลายของเกลือ เกลือซัลเฟตจะตกผลึกออกมาภายในช่องว่างเล็กๆ หรือรูพรุนของเนื้อวัสดุ แต่เนื่องจากความชื้นในวัสดุไม่คงที่ และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศก็ไม่คงที่ เพราะฉะนั้นในบางขณะความชื้นระเหยออกไปได้มากจนวัสดุแห้งเกลือจะตกผลึก และในบางขณะความชื้นระเหยออกไปได้น้อยเนื้อวัสดุเปียก เกลือจะละลายน้ำกลายเป็นสารละลาย ซึ่งในวันหนึ่งๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวกลับไปมาหลายครั้ง การที่เกลือตกผลึกซ้ำแล้วซ้ำเล่าอยู่ภายในเนื้อที่จำกัด ผลึกของเกลือมีปริมาตรโตขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดผลึกที่โตขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิดแรงดันตรงผนังของช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุ และจะระเบิดทำให้ผนังของช่องว่างภายในเนื้อวัสดุแตกออก ทำลายโครงสร้าง วัสดุจะมีสภาพเปื่อยยุ่ยหลุดร่วงออกมาเป็นผง ซึ่งทำให้เนื้อของวัสดุหายไปจากเดิม หากนำผงวัสดุที่หลุดร่วงเหล่านี้ไปวิเคราะห์จะพบเกลือที่ละลายน้ำได้อยู่เสมอ

ดังนั้นจึงสามารถนำมาอธิบายการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโบราณสถาน ซึ่งตั้งอยู่บริเวณพื้นที่โล่งหรือกลางแจ้งเป็นเวลานาน การที่เกลือที่เกิดขึ้นนี้เป็นเกลือที่ละลายน้ำ จึงถูกฝนชะล้างออกไปเรื่อยๆ คงเหลือแต่วัสดุก่อสร้างของโบราณสถานที่สึกกร่อนผุพังลงไปทุกที เพราะเมื่อผิวเดิมผุเปื่อยและถูกฝนชะออกไป ส่วนที่อยู่ลึกถัดเข้าไปก็จะกลายเป็นเกลือมาสะสมอยู่ และจะผุเปื่อยหลุดร่วงหายไปทีละชั้นเป็นเช่นนี้เรื่อยไป ปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาตราบใดที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปะปนอยู่ในบรรยากาศ แม้ในบรรยากาศที่บริสุทธิ์ก็มีก๊าซเหล่านี้อยู่แต่มีเพียงเล็กน้อยปฏิกิริยาจึงเกิดอย่างช้าๆ ทีละน้อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปนานเข้าวัสดุจะสึกกร่อนและปริมาณเกลือจะสูงขึ้นเรื่อยๆ กระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือทางเคมี อย่างใดอย่างหนึ่ง หรืออาจเกิดจากทั้งสองอย่างผสมผสานกัน ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทำให้วัสดุสึกกร่อน ขาดความแข็งแรง แตกหัก หรือหลุดร่อนออกเป็นผง เพราะขาดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ

วัสดุก่อสร้างของโบราณสถานนั้นๆ ส่วนวัสดุประสานอาจทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือแล้วละลายหายไป ทำให้วัสดุก่อสร้างของโบราณสถาน โปรง พูน และอ่อนนุ่ม

2) นำหนักวัสดุที่หายไป

จากการอธิบายข้างต้น นำหนักของวัสดุตัวอย่างที่หายไปนั้นเกิดจากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ทำให้วัสดุมีการเสื่อมสภาพ และหลุดร่วงออกมาเป็นผงเพราะขาดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุนั้นๆ

จากการศึกษานำหนักที่หายไปของวัสดุตัวอย่าง โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์นำหนักที่หายไปของวัสดุตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน ที่เกิดขึ้นในการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแต่ละความเข้มข้น และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์นำหนักที่เพิ่มขึ้นในการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์นำหนักที่หายไปหลังทำการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้ง 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 50, 100, 200, 400 และ 800 ส่วนในล้านส่วน นั้น เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 10 สัปดาห์ ปรากฏว่าปูนปั้นเก่าเกิดการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงคือ ปูนปั้นปัจจุบัน, อิฐเก่า และ อิฐปัจจุบัน ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์นำหนักที่หายไปเท่ากับ 0.4389 เปอร์เซ็นต์, 0.2131 เปอร์เซ็นต์, 4.8349×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ และ 1.2047×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ทั้งนี้ค่าผลการกัดกร่อนที่ได้ทั้งหมดจากการคำนวณ จะอยู่ภายใต้สมมติฐานจากการให้วัสดุรูปลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตรเมตร สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้น 50-800 ส่วนในล้านส่วน ในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 สภาพพื้นที่ศึกษา

จากการตรวจวัด และการทดลองในงานวิจัยนี้ ทำให้พบว่าจากการจัดงานอยุธยาามรดกนั้น เกิดปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นจากสภาวะปกติ คือ จากการตรวจวัดในสภาวะปกติโดยกรมควบคุมมลพิษได้ 3.2 ส่วนในพันล้านส่วน เป็น 9.8 ส่วนในพันล้านส่วน นั่นคือโบราณสถานบริเวณวัดพระราม จะต้องสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นประมาณ 3 เท่า ซึ่งส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนได้มากขึ้น แม้ว่าในวัสดุตัวอย่างชนิดอิฐเก่า และอิฐปัจจุบันนั้น จะไม่สามารถสังเกตเห็นอัตราการกัดกร่อนเป็นค่าตัวเลขได้ คือมีอัตราการกัดกร่อนเท่าเดิม คือ 6.6210×10^{-3} เปอร์เซ็นต์ และ 3.8070×10^{-3} เปอร์เซ็นต์ แต่ในปูนปั้นเก่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

จาก 6.1074×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ เป็น 6.1078×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ส่วนปูนปั้นปัจจุบันมีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นจาก 2.1850×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ เป็น 2.1854×10^{-2} เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานจากการให้วัสดุรูปลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตรเมตร สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ความเข้มข้น 50–800 ส่วนในล้านส่วน ในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 29.5 ± 2 องศาเซลเซียส และที่ ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 10 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่าในพื้นที่ศึกษาที่มีการจัดงานอยุธยา มรดกโลกนั้น มีผลให้โบราณสถานบริเวณวัดพระรามซึ่งเป็นสถานที่จัดงานดังกล่าว มีการสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่เกิดค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเกิดการกัดกร่อนมากขึ้น นั่นคือเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนจะเกิดได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบ ดังนี้

1) ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

หากมีความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาก จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้มาก และหากมีความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อย ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้น้อย

2) ระยะเวลาในการสัมผัส

วัสดุที่ทำการสัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระยะเวลาสั้นกว่า ย่อมจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้มากกว่าวัสดุที่สัมผัสก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระยะเวลาสั้นกว่า

3) ชนิดของวัสดุ

จากผลการวิจัยทำให้ทราบว่าในวัสดุแต่ละชนิด จะเกิดอัตราการกัดกร่อนที่ไม่เท่ากัน จึงต้องทำการศึกษาถึงคุณสมบัติ และการกัดกร่อนแยกตามแต่ละชนิดออกไป

5.1.4 การประยุกต์สมการอัตราการกัดกร่อนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ISCST3

จากการนำสมการอัตราการกัดกร่อนมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความถูกต้องของการทำนายนอกจากจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของสมการอัตราการกัดกร่อนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกใช้อีกด้วย ซึ่งถ้าหากตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ สามารถวิเคราะห์ปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

หรือมีความถูกต้องสูง ก็จะช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับสมการอัตราการกัดกร่อนไปด้วย ในการวิจัยได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ISCST3 โดยทำนายปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระดับพื้นดินบริเวณตลาดเจ้าพรหม เกาะเมือง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา อันเป็นที่ตั้งของแหล่งโบราณสถานและแหล่งชุมชน ซึ่งครอบคลุมถึงโบราณสถานบริเวณวัดพระราม โดยมีแหล่งกำเนิดก๊าซมลพิษมาจากนิคมอุตสาหกรรมในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาทั้งหมด 4 แห่ง ได้แก่ นิคมอุตสาหกรรมสหรัตนนคร, นิคมอุตสาหกรรมโรจนะ, นิคมอุตสาหกรรมบ้านหว้า และนิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน โดยพบว่ามีความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระดับพื้นดินอยู่ในช่วง 0.1-0.29 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งหากความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์คงที่ที่ 0.29 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ไปเรื่อยๆ เป็นระยะเวลา 1 ปี จะก่อให้เกิดอัตราการกัดกร่อนต่ออิฐเก่า 0.1578 เปอร์เซ็นต์ อิฐปัจจุบัน 0.0263 เปอร์เซ็นต์ ปูนปั้นเก่า 2.9041 เปอร์เซ็นต์ และปูนปั้นปัจจุบัน 1.1433 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าในวัสดุแต่ละชนิด ขนาด 2.5 x 2.5 x 2.5 เซนติเมตร จะเกิดการกัดกร่อน 100 เปอร์เซ็นต์ในระยะเวลาที่ต่างกันออกไป ดังนี้ อิฐเก่าจะใช้เวลาประมาณ 646 ปี อิฐปัจจุบันใช้เวลาประมาณ 4,332 ปี ปูนปั้นเก่าใช้เวลาประมาณ 35 ปี และปูนปั้นปัจจุบันใช้เวลา ประมาณ 87 ปี

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการศึกษาการกัดกร่อนนั้น เนื่องจากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมีมาจากสาเหตุ หรือปัจจัยต่างๆ หลายประการด้วยกัน เช่น ความชื้น, แสงสว่าง, อุณหภูมิ ตลอดจนปัจจัยในตัววัสดุเอง เป็นต้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาต่อถึงปัจจัยในด้านอื่นๆ เพื่อการสร้างสรรค์สมการในการคาดคะเนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นให้มีความแม่นยำมากขึ้น
- 2) ข้อจำกัดของเครื่องมือที่ทำการพัฒนาในการศึกษาการกัดกร่อนนี้ ยังมีข้อจำกัดอยู่มาก ควรได้รับการพัฒนาต่อเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น สามารถตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซมลพิษที่ใช้ในห้องทดสอบได้ตลอดเวลา มีเครื่องมือในการผลิตและควบคุมความเข้มข้นของก๊าซ ตลอดจนสามารถกำหนดค่า และตรวจสอบความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบได้ เนื่องจากความชื้นก็เป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญในการเข้าร่วมเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เร็วขึ้น
- 3) ควรมีการศึกษาการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนจากก๊าซมลพิษอื่นๆ ที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนวัสดุ เช่น ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากในบรรยากาศจะมีก๊าซต่างๆ เหล่านี้ผสมกันอยู่ ซึ่งของผลการกัดกร่อนที่ได้อาจมีฤทธิ์เสริมกัน หรือหักล้างกัน ทั้งนี้เพื่อการทำนายที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

4) ควรมีการศึกษา และกำหนดค่ามาตรฐานของปริมาณก๊าซมลพิษ ต่อโบราณสถานต่างๆ เนื่องจากมีโบราณสถานที่สำคัญหลายแห่งที่ตั้งอยู่บริเวณชุมชน หรือบริเวณเขตโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพื่อการจัดการที่เหมาะสมต่อไป

5) ควรมีการศึกษาปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งจากการจัดงานเฉลิมฉลอง หรือจากยานพาหนะที่เข้าใกล้โบราณสถาน ตลอดจนอิทธิพลของลมมรสุม และลมประจำถิ่น ซึ่งมีผลในการกระจายตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อการวางแผนการจัดการที่เหมาะสม เพื่อช่วยรักษาสภาพโบราณสถาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรณีการ เกิดมลงคล. 2529. ต้นทุนและผลตอบแทนจากการลงทุนผลิตอิฐมอญระดับอุตสาหกรรมในครัวเรือน ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา และอ่างทอง.

วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณเฑาะฏีมหาบัณฑิต ภาควิชาการบัญชี บัณเฑาะฏีวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กัญญา ตรีภูลล. 2530. เทคโนโลยีการกัดกร่อน (Corrosion Technology). บริษัทกราฟแมนเพรส จำกัด. กรุงเทพมหานคร.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2546. การวิเคราะห์สถิติ : สถิติสำหรับการบริหารและวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เกษม จันทรแก้ว. 2545. การจัดการสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เกษม ชุตทอง, มงคล ศรีเรือง และ ปัญญา ศรีจันทร์. 2537. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการกัดกร่อนและวิธีป้องกัน. วารสารโลหะ วัสดุ และการกัดกร่อน 1 (พฤศจิกายน): 9-17.

ควบคุมมลพิษ,กรม. 2540. นโยบายและแผนจัดการมลพิษ. กรุงเทพมหานคร

ควบคุมมลพิษ,กรม และสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543. เอกสารประกอบการฝึกอบรมการประเมินคุณภาพอากาศจากแหล่งกำเนิดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.

จัดการคุณภาพอากาศและเสียง, กอง. 2540. การวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านคุณภาพอากาศโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.

จิราภรณ์ อรัณยษนาค. 2539. สาเหตุที่ทำให้อิฐและหินบนโบราณสถานผุเปื่อย. วารสารการวิจัยและพัฒนา 10 : 18 – 28.

ดำรงศักดิ์ ชัยสนิท และ ก่อเกียรติ วิริยะกิจพัฒนา. 2546. การจัดการสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์วังอักษร.

เทียมดารา จุนเจือ. 2546. การจัดการมลพิษทางอากาศเพื่อรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณเฑาะฏีวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ธิติมา หวังธีระประเสริฐ. 2539. ปูนปั้น. ใน จิราภรณ์ อรัณยะนาถ (บรรณาธิการ),
การดูแลรักษาศิลปโบราณวัตถุ, หน้า 59-62. กรุงเทพมหานคร :
โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- นงนุช นัยยุติ. 2540. การวางแผนการใช้ที่ดินเพื่อรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมในจังหวัด
พระนครศรีอยุธยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชา
การวางแผนภาคและเมือง บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นพภาพร พานิช และ แสงสันต์ พานิช. 2544. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านคุณภาพอากาศ.
พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พวรรณทิ ธรรมธราธาร. 2539. การดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเถ้าลอยอัดเม็ดในฟลูอิโดซ์เบด.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิภพ สุนทรสมัย. 2530. วัสดุวิศวกรรมก่อสร้าง. กรุงเทพมหานคร : เอช-เอน การพิมพ์.
- ภาณุพงศ์ กอปรศรีสวัสดิ์. 2543. ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็ก.
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภักดี ทรงเจริญ. 2542. การดูแลและการกัดกร่อนกับการอนุรักษ์โบราณสถานและโบราณวัตถุ.
วารสารข่าวสารการธรณี 4 : 58 – 64.
- แมคโครคอนกรีตแดนท์. 2534. การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมโครงการนิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน.
กรุงเทพมหานคร.
- วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล, ธีระ เกรอต. 2543. มลภาวะอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 6.
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรารุณ เสือดี. 2541. การศึกษามลภาวะทางอากาศในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
สถาบันไทย คดีศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, สมาคม. 2544. ศัพท์บัญญัติและนิยามมลพิษทางอากาศ.
พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงาน
เบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สภาวัฒนธรรมจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. 2540. อยุธยา มรดกโลก. พระนครศรีอยุธยา:
โรงพิมพ์เทียนวัฒนา.

สุนิสา จันทราสกา วงศ์. 2543. การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารมลพิษทางอากาศบริเวณแหล่ง
ศิลปกรรมในกรุงเทพมหานคร กรณีศึกษา:พิพิธภัณฑ์สถานแห่งชาติพระนคร, วังบางขุนพรหม
และวัดเบญจมบพิตร. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ศิลปากร,กรม. 2539. การดูแลรักษาศิลปโบราณวัตถุ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร :
โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ. 2542. มลภาวะทางอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2547. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 14.
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์. 2537. ปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุตสาหกรรมจังหวัด, สำนักงาน. 2543. ทำเนียบโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปี
2542. พระนครศรีอยุธยา: สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดพระนครศรีอยุธยา.

อำนาจ เจริญศิลป์. 2543. การจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1.
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

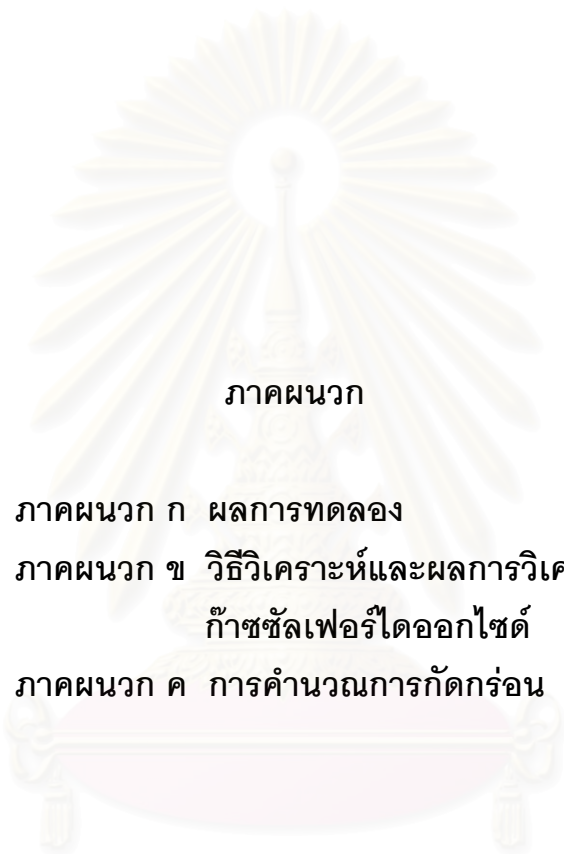
- Bellam, N. and Kumar, A. 1996. Performance of an industrial source complex model; Predicting long-term concentrations in an urban area. Available from:
<http://www.utoledo.edu/~aprg/theses/theses.html>. [2002, Jan 19].
- Böke, H., Göktürk, E., Emine, N. and Demirci, S. 1999. Effect of airborne particles on SO₂-calcite reaction. Applied Surface Science 140 : 70-82.
- Böke, H., Göktürk, E. and Saltik, C. 2002. Effect of some surfactants on SO₂-marble reaction. Material Letters 57 : 935-939.
- Blanco-Varela, M. T. 2003. Thaumassite formation due to atmospheric SO₂-hydraulic mortar interaction. Cement & Concrete Composites 25 : 983-990.
- Chiraporn Aranyanark.. 2001. Salt Weathering of Monumental Building Materials in Thailand. Conservation of Monuments in Thailand [II] : 48-52.
- CSIRO. 2001. Climate Change Projections for Australia. Climate Impact Group, CSIRO Atmospheric Research, Melbourne. Available from:
<http://dar.csiro.au/publications/scenario2001.htm>
- Demirbas, A., Öztürk, T. and Karatas, F. 2001. Long-term wear on outside walls of buildings by sulfur dioxide corrosion. Cement and Concrete Research 31 : 3-6
- Farrow L. A., Graedel T. E. and Leygraf, C. 1996. GILDES model studies of aqueous chemistry. II. The corrosion of zinc in gaseous exposure chambers. Corrosion Science 38 : 2181-2199.
- Fenter, F., Caloz, M. and Rossi, J. 1995. Experimental Evidence for the Efficient "Dry Deposition" of Nitric Acid on Calcite. Atmospheric Environment 29 : 3365-3372
- Gobbi, G., Zappia, G. and Sabbioni, C. 1998. Sulphite quantification on damaged stones and mortars. Atmospheric Environment 32 : 783-789.
- Guidobaldi, F. and Mecchi, A. 1993. Corrosion of ancient marble monuments by rain: Evaluation of pre-industrial recession rates by laboratory simulations. Atmospheric Environment. 27 : 339-351.

- Haneef, S., Johnson, J., Dickinson, C., Thompson, G. and Wood, G. 1992. Effect of dry deposition of NO₂ and SO₂ gaseous pollutants on the degradation of calcareous building stones. Atmospheric Environment 26 : 2963-2969.
- Haneef S. J., Johnson J. B., Thompson G. E. and Wood G. C. 1993. Effect of Dry Deposition of Pollutant Gases on the Degradation of Pentelic Marble. Corrosion Science 35 : 743-750.
- HSDB. 2000. Hazardous Substances Data Base. National Library of Medicine. Available from: <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/html>.
- Johansson, L. G., Lindqvist, O. and Mangio, R. E. 1998. Corrosion of calcareous stones in humid air containing SO₂ and NO₂. Durability Building Materials 5 : 439-449.
- Jesse, L. and Cristiane, L. User's Guide for ISC-Aermod View : Lakes Environmental Software'2002.
- Jesse, L. and Cristiane, L. User's Guide for ISC-Aermod View Tutorials : Lakes Environmental Software'2002.
- Kouchi, A. 2001. Development of Atmospheric Dispersion Model for Environmental Impact Assessment of complicated Industrial Area. 7th International Conference Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purposes : 1-5, 28-31.
- Levy, F.I. 1998. Impact of Residential Nitrogen Dioxide Exposure on personal Exposure; An International Study. Journal of the Air & Waste Management Association 48 (June) : 553-560.
- Nriagu, O. 1978. Sulfur in the environment Part II : Ecological Impacts. Canada : Wiley-Interscience publication.
- Perry, S. and Duffy, A. 1997. The short-term effects of mortar joints on salt movement in stone. Atmospheric Environment 31 : 1297-1305.
- Primerano, P., Marino, G., Di Pasquale, S., Mavilia, L. and Corigliano, F. 2000. Possible alteration of monuments caused by particles emitted into the atmosphere carrying strong primary acidity. Atmospheric Environment 34 : 3889-3896.

- Sabbioni, C., Ghedini, N. and Bonazza, A. 2003. Organic anions in damage layers on monuments and buildings. Atmospheric Environment 37 : 1261-1269.
- Schulze, R.H. and Turner, D.B. 1997. Practical guide to atmospheric dispersion modeling.
- Skotis, D., Paradellis, T. and Katselis, V. 1979. Trace Element characterization of coal fly ash particles. Nuclear Instrumenta and Methods in Physics Research 99 : 1101-1104.
- United States Environmental Protection, Agency. 1996. AP42 Compilation of Air Emission Factor. Office of Research and Development.
- Zappia, G., Sabbioni, C.,Pauri, M. G. and Gobbi, G. 1994. Mortar damage due to airborne sulphur compounds in simulation chamber. Materails and Structures 27 : 469-473.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลการทดลอง

ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ปริมาณ
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ภาคผนวก ค การคำนวณการกักถ้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป (% Weight Loss)

(1) อัฐปัจจุบัน

	code	Weight (g.)		W.L	%W.L	Average %W.L
		before	after			
Week 1	111	11.5648	11.5646	0.0002	0.0017	
	112	14.5222	14.5196	0.0026	0.0179	0.0148
	113	12.1248	12.1218	0.0030	0.0247	
	211	13.8802	13.8791	0.0011	0.0079	
	212	11.3744	11.3729	0.0015	0.0132	0.0125
	213	12.1439	12.1419	0.0020	0.0165	
	311	10.9707	10.9694	0.0013	0.0118	
	312	10.7313	10.7304	0.0009	0.0084	0.0098
	313	9.8540	9.8531	0.0009	0.0091	
	411	11.0949	11.0942	0.0007	0.0063	
	412	14.4457	14.4449	0.0008	0.0055	0.0060
	413	13.2501	13.2493	0.0008	0.0060	
	511	16.0935	16.0929	0.0006	0.0037	
	512	12.3038	12.3037	0.0001	0.0008	0.0022
	513	14.0014	14.0011	0.0003	0.0021	
week 2	121	10.9365	10.9343	0.0022	0.0201	
	122	13.4788	13.4759	0.0029	0.0215	0.0207
	123	11.8085	11.8061	0.0024	0.0203	
	221	13.6380	13.6367	0.0013	0.0095	
	222	10.1884	10.1866	0.0018	0.0177	0.0128
	223	11.7521	11.7508	0.0013	0.0111	
	321	9.4880	9.4867	0.0013	0.0137	
	322	14.2818	14.2806	0.0012	0.0084	0.0098
	323	12.3437	12.3428	0.0009	0.0073	
	421	12.0875	12.0858	0.0017	0.0141	
	422	16.3007	16.3002	0.0005	0.0031	0.0085
	423	14.3873	14.3861	0.0012	0.0083	
	521	11.2113	11.2111	0.0002	0.0018	
	522	13.5208	13.5203	0.0005	0.0037	0.0029
	523	12.4812	12.4808	0.0004	0.0032	
week 3	131	13.1209	13.1182	0.0027	0.0206	
	132	9.8097	9.8076	0.0021	0.0214	0.0210
	133	11.9107	11.9082	0.0025	0.0210	
	231	12.8039	12.8026	0.0013	0.0102	
	232	12.6595	12.6582	0.0013	0.0103	0.0129
	233	11.4054	11.4033	0.0021	0.0184	
	331	12.8589	12.8587	0.0002	0.0016	
	332	12.2328	12.2311	0.0017	0.0139	0.0101

	code	Weight (g.)		W.L	%W.L	Average %W.L
		before	after			
	333	10.0885	10.0870	0.0015	0.0149	
	431	8.0276	8.0269	0.0007	0.0087	
	432	14.6966	14.6956	0.0010	0.0068	0.0087
	433	11.3547	11.3535	0.0012	0.0106	
	531	10.2130	10.2124	0.0006	0.0059	
	532	15.1760	15.1759	0.0001	0.0007	0.0029
	533	13.3694	13.3691	0.0003	0.0022	
week 4	141	9.0230	9.0215	0.0015	0.0166	
	142	13.8766	13.8734	0.0032	0.0231	0.0211
	143	11.8940	11.8912	0.0028	0.0235	
	241	15.9898	15.9877	0.0021	0.0131	
	242	9.6848	9.6838	0.0010	0.0103	0.0130
	243	12.8831	12.8811	0.0020	0.0155	
	341	15.0929	15.0911	0.0018	0.0119	
	342	11.4255	11.4245	0.0010	0.0088	0.0104
	343	13.2153	13.2139	0.0014	0.0106	
	441	12.7859	12.7850	0.0009	0.0070	
	442	11.1444	11.1434	0.0010	0.0090	0.0087
	443	11.8511	11.8499	0.0012	0.0101	
	541	15.2125	15.2113	0.0012	0.0079	
	542	10.6906	10.6905	0.0001	0.0009	0.0052
	543	13.4513	13.4504	0.0009	0.0067	
week 5	151	9.2084	9.2064	0.0020	0.0217	
	152	15.8924	15.8891	0.0033	0.0208	0.0222
	153	12.0908	12.0879	0.0029	0.0240	
	251	14.5694	14.5679	0.0015	0.0103	
	252	12.9301	12.9284	0.0017	0.0131	0.0133
	253	13.9701	13.9678	0.0023	0.0165	
	351	11.3854	11.3840	0.0014	0.0123	
	352	12.1826	12.1812	0.0014	0.0115	0.0112
	353	13.4484	13.4471	0.0013	0.0097	
	451	12.7887	12.7876	0.0011	0.0086	
	452	11.5702	11.5693	0.0009	0.0078	0.0088
	453	11.8513	11.8501	0.0012	0.0101	
	551	14.5798	14.5792	0.0006	0.0041	
	552	15.5845	15.5830	0.0015	0.0096	0.0053
	553	14.8750	14.8747	0.0003	0.0020	
week 6	161	13.3059	13.3021	0.0038	0.0286	
	162	10.4213	10.4194	0.0019	0.0182	0.0225
	163	11.9862	11.9837	0.0025	0.0209	
	261	11.5332	11.5320	0.0012	0.0104	
	262	12.5372	12.5353	0.0019	0.0152	0.0137

	code	Weight (g.)		W.L	%W.L	Average %W.L
		before	after			
	263	11.0031	11.0014	0.0017	0.0155	
	361	15.4848	15.4827	0.0021	0.0136	
	362	10.0492	10.0482	0.0010	0.0100	0.0111
	363	13.1331	13.1318	0.0013	0.0099	
	461	15.0556	15.0543	0.0013	0.0086	
	462	11.2238	11.2228	0.0010	0.0089	0.0096
	463	13.3071	13.3056	0.0015	0.0113	
	561	12.1234	12.1229	0.0005	0.0041	
	562	10.5705	10.5701	0.0004	0.0038	0.0055
	563	11.6939	11.6929	0.0010	0.0086	
week 7	171	11.7126	11.7098	0.0028	0.0239	
	172	14.6917	14.6885	0.0032	0.0218	0.0225
	173	12.9184	12.9156	0.0028	0.0217	
	271	10.9438	10.9422	0.0016	0.0146	
	272	18.5838	18.5815	0.0023	0.0124	0.0136
	273	15.1115	15.1094	0.0021	0.0139	
	371	11.6443	11.6431	0.0012	0.0103	
	372	14.0241	14.0223	0.0018	0.0128	0.0116
	373	12.9684	12.9669	0.0015	0.0116	
	471	16.7911	16.7896	0.0015	0.0089	
	472	10.1544	10.1533	0.0011	0.0108	0.0095
	473	13.8450	13.8438	0.0012	0.0087	
	571	11.0921	11.0915	0.0006	0.0054	
	572	15.2424	15.2415	0.0009	0.0059	0.0060
	573	13.4345	13.4336	0.0009	0.0067	
week 8	181	12.8290	12.8266	0.0024	0.0187	
	182	11.1557	11.1528	0.0029	0.0260	0.0252
	183	11.9747	11.9710	0.0037	0.0309	
	281	9.6573	9.6559	0.0014	0.0145	
	282	16.5764	16.5738	0.0026	0.0157	0.0136
	283	13.1229	13.1215	0.0014	0.0107	
	381	16.5597	16.5578	0.0019	0.0115	
	382	8.6061	8.6055	0.0006	0.0070	0.0117
	383	12.5515	12.5494	0.0021	0.0167	
	481	9.2694	9.2693	0.0001	0.0011	
	482	13.3040	13.3018	0.0022	0.0165	0.0096
	483	11.5684	11.5671	0.0013	0.0112	
	581	10.1265	10.1255	0.0010	0.0099	
	582	11.0901	11.0897	0.0004	0.0036	0.0063
	583	10.9981	10.9975	0.0006	0.0055	
week 9	191	10.3248	10.3214	0.0034	0.0329	
	192	10.5057	10.5034	0.0023	0.0219	0.0251

	code	Weight (g.)		W.L	%W.L	Average %W.L
		before	after			
	193	11.7916	11.7892	0.0024	0.0204	
	291	14.2356	14.2335	0.0021	0.0148	
	292	8.5072	8.5064	0.0008	0.0094	0.0141
	293	11.6049	11.6028	0.0021	0.0181	
	391	12.3276	12.3258	0.0018	0.0146	
	392	12.9952	12.9935	0.0017	0.0131	0.0118
	393	13.2137	13.2127	0.0010	0.0076	
	491	10.4065	10.4056	0.0009	0.0086	
	492	11.8276	11.8262	0.0014	0.0118	0.0099
	493	10.9123	10.9113	0.0010	0.0092	
	591	13.1761	13.1753	0.0008	0.0061	
	592	11.5241	11.5234	0.0007	0.0061	0.0064
	593	12.6893	12.6884	0.0009	0.0071	
week 10	101	10.4364	10.4339	0.0025	0.0240	
	102	13.2008	13.1974	0.0034	0.0258	0.0254
	103	12.4528	12.4495	0.0033	0.0265	
	201	13.4457	13.4439	0.0018	0.0134	
	202	14.3723	14.3702	0.0021	0.0146	0.0142
	203	13.7496	13.7476	0.0020	0.0145	
	301	10.9012	10.8999	0.0013	0.0119	
	302	10.0269	10.0257	0.0012	0.0120	0.0121
	303	9.7836	9.7824	0.0012	0.0123	
	401	10.7874	10.7862	0.0012	0.0111	
	402	10.6721	10.6709	0.0012	0.0112	0.0101
	403	11.3436	11.3427	0.0009	0.0079	
	501	13.6989	13.6982	0.0007	0.0051	
	502	9.8322	9.8314	0.0008	0.0081	0.0065
	503	11.4601	11.4594	0.0007	0.0061	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 การหาความหนาแน่นของวัสดุตัวอย่าง ได้แก่ อิฐเก่า, อิฐปัจจุบัน, ปูนปั้นเก่า และปูนปั้นปัจจุบัน

	ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่น * (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่น เฉลี่ย
อิฐเก่า	1	32.6364	15.5	2.1056	2.0795
	2	17.9176	8.7	2.0595	
	3	13.0478	6.0	2.1746	
	4	28.3851	14.0	2.0275	
	5	25.3816	12.5	2.0305	
อิฐปัจจุบัน	1	14.3116	8.4	1.7038	1.8218
	2	11.8902	6.5	1.8293	
	3	14.6016	8.3	1.7592	
	4	11.6706	6.4	1.8235	
	5	13.0813	7.0	1.8688	
	6	11.3541	6.2	1.8313	
	7	15.0878	8.4	1.7962	
	8	10.2333	5.4	1.8951	
	9	9.8857	5.4	1.8307	
	10	10.5788	5.6	1.8891	
ปูนปั้นเก่า	1	13.2414	7.0	1.8916	1.9107
	2	15.0554	7.8	1.9302	
	3	14.3595	7.3	1.9671	
	4	9.7864	5.4	1.8123	
	5	13.6671	7.0	1.9524	

	ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่น * (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่น เฉลี่ย
ปูนปั้นปัจจุบัน	1	10.8418	5.6	1.9360	1.9486
	2	11.1635	5.8	1.9247	
	3	10.8966	5.6	1.9458	
	4	12.1719	6.2	1.9632	
	5	12.1210	6.2	1.9550	
	6	12.2436	6.3	1.9434	
	7	11.7753	6.0	1.9626	
	8	10.7205	5.5	1.9492	
	9	11.7606	6.0	1.9601	
	10	11.4870	5.9	1.9469	

หมายเหตุ : * คำนวณจากสูตร $D = \frac{M}{V}$

เมื่อ D = ความหนาแน่น, กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

M = มวล (กรัม)

V = ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลของปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทำการตรวจวัดโดยเครื่อง MultiRAE

Instrument: Multi-gas Monitor (IR)		Serial Number: 000198			
User ID: 000		Site ID: 00000001			
Data Points: 112		Data Type: Avg		Sample Period: 10 sec	
Last Calibration Time: 08/23/2004 11:13					
=====					
=====					
Gas Type:			SO2(ppm)		VOC(ppm)
High Alarm Levels:			50		15
Low Alarm Levels:			8		50
=====					
=====					
Line#	Date Time	SO2(ppm)	Alarm	VOC(ppm)	Alarm
=====					
=====					
1	#####	0.8	L	1	
2	#####	0.8	L	1	
3	#####	0.7	L	1.1	
4	#####	0.2	L	1.1	
5	#####	0.2	L	1.1	
6	#####	0.2	L	1.1	
7	#####	0	L	1.1	
8	#####	0.5	L	1	
9	#####	1.6	L	0.8	
10	#####	1.2	L	0.5	
11	#####	0.3	L	0.5	
12	#####	1.2	L	0.4	
13	#####	1.9	L	0.5	
14	#####	2.3	L	0.5	
15	#####	2.7	L	0.5	
16	#####	3.1	L	0.4	
17	#####	3.4	L	0.4	
18	#####	3.9	L	0.4	
19	#####	4.5	L	0.4	
20	#####	5.4	L	0.4	
21	#####	6.1	L	0.5	
22	#####	6.4	L	0.4	
23	#####	7	L	0.4	
24	#####	8	L	0.5	
25	#####	7.6	L	0.5	
26	#####	7.9	L	0.5	
27	#####	6.7	L	0.4	
28	#####	7.2	L	0.5	
29	#####	7.1	L	0.4	
30	#####	7.2	L	0.4	
31	#####	7.6	L	0.4	
32	#####	8.7	L	0.4	
33	#####	10	L	0.5	
34	#####	10.1	L	0.5	

35	#####	10.4 L	0.4
36	#####	11.5 L	0.2
37	#####	11.8 L	0.3
38	#####	10.2 L	0.5
39	#####	10.1 L	0.5
40	#####	9.4 L	0.6
41	#####	8.6 L	0.6
42	#####	7.7 L	0.6
43	#####	6.5 L	0.6
44	#####	5.1 L	0.5
45	#####	4.2 L	0.4
46	#####	2.1 L	0.7
47	#####	0.4 L	1
48	#####	0.8 L	1.1
49	#####	0.5 L	1.1
50	#####	0.9 L	1.1
51	#####	1.4 L	1.1
52	#####	2.9 L	1.1
53	#####	10.4 L	0.5
54	#####	12.6 L	0.5
55	#####	12.9 L	0.4
56	#####	14.5 L	0.4
57	#####	17.9 L	0.6
58	#####	18.2 L	0.6
59	#####	19.5 L	0.5
60	#####	19.9 L	0.5
61	#####	21.3 H	0.4
62	#####	22.2 H	0.4
63	#####	17.4 L	0.4
64	#####	14.2 L	0.4
65	#####	13.1 L	0.3
66	#####	10.6 L	0.4
67	#####	8.7 L	0.4
68	#####	7.4 L	0.3
69	#####	4.7 L	0.3
70	#####	0.9 L	1.1
71	#####	0.8 L	1
72	#####	0.8 L	1
73	#####	3.1 L	0.7
74	#####	8.2 L	0.5
75	#####	9.1 L	0.2
76	#####	13.3 L	0.2
77	#####	16.9 L	0.3
78	#####	17.4 L	0.3
79	#####	18.1 L	0.3
80	#####	19 L	0.3
81	#####	20.7 H	0.5
82	#####	21 H	0.6
83	#####	21.8 H	0.7
84	#####	21.9 H	0.6

85	#####	23.5	H	0.5
86	#####	24.5	H	0.6
87	#####	25.5	H	0.5
88	#####	29.1	H	0.6
89	#####	29.6	H	0.5
90	#####	30.2	H	0.5
91	#####	30.5	H	0.6
92	#####	32.4	H	0.6
93	#####	25.9	H	0.2
94	#####	21.3	H	0.1
95	#####	18.8	L	0.3
96	#####	14.9	L	0.3
97	#####	10.2	L	0.3
98	#####	8.4	L	0.3
99	#####	5.5	L	0.2
100	#####	3.6	L	0.2
101	#####	2.6	L	0.3
102	#####	0.8	L	0.3
103	#####	0.7	L	0.4
104	#####	0.8	L	0.4
105	#####	0.8	L	0.4
106	#####	3.3	L	0.4
107	#####	8.4	L	0.4
108	#####	10.1	L	0.5
109	#####	13.6	L	0.5
110	#####	19.9	L	0.5
111	#####	22.4	H	0.5
112	#####	24.1	H	0.5
113	#####	27.1	H	0.5
114	#####	28.3	H	0.5
115	#####	29.4	H	0.5
116	#####	31.2	H	0.5
117	#####	33.4	H	0.6
118	#####	35.4	H	0.6
119	#####	37.7	H	0.5
120	#####	38.9	H	0.5
121	#####	39.8	H	0.5
122	#####	40.7	H	0.6
123	#####	41.6	H	0.5
124	#####	41.9	H	0.5
125	#####	40.7	H	0.4
126	#####	39.9	H	0.5
127	#####	35.9	H	0.2
128	#####	30	H	0.1
129	#####	27.1	H	0.1
130	#####	24.4	H	0.1
131	#####	21.7	H	0
132	#####	20.2	H	0
133	#####	18.6	L	0
134	#####	16.2	L	0.5

135	#####	11.3	L	0.4
136	#####	10	L	0.4
137	#####	8.4	L	0.5
138	#####	6.3	L	0.6
139	#####	3.3	L	0.5
140	#####	2.1	L	0.3
141	#####	2	L	0.1
142	#####	1.1	L	0.1
143	#####	1.1	L	0.1
144	#####	4.5	L	0.1
145	#####	7.8	L	0.1
146	#####	9.6	L	0.2
147	#####	10.1	L	0.2
148	#####	17.1	L	0.2
149	#####	18.4	L	0.2
150	#####	18.9	L	0.2
151	#####	19.2	L	0
152	#####	22.8	H	0.3
153	#####	25.1	H	0.4
154	#####	28.7	H	0.5
155	#####	29.8	H	0.3
156	#####	33.1	H	0.5
157	#####	36.6	H	0.4
158	#####	37.1	H	0.5
159	#####	40.8	H	0.4
160	#####	44.1	H	0.5
161	#####	45.1	H	0.6
162	#####	46.7	H	0.2
163	#####	47.5	H	0.1
164	#####	48.7	H	0
165	#####	49.7	H	0.1
166	#####	50.5	H	0.5
167	#####	51.8	H	0.4
168	#####	52.9	H	0.4
169	#####	49	H	0.3
170	#####	47	H	0.3
171	#####	40.1	H	0.2
172	#####	37.7	H	0.3
173	#####	34.1	H	0.2

ตารางที่ ก.4 แสดงข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ โดยเครื่องมือตรวจวัด

อุตุนิยมวิทยา MicroLog

Comment : MicroLog - Fourier Systems LTD. S/N : 503873					
Alarm levels setup:					
Temperature(°C)		low = -30.00 high = 50.00			
Humidity(%)		low = 0.00 high = 100.00			
Date (dd-mmm-yy)	Time (hh:mm:ss)	Temperature (°C)	Humidity(%)	Alarm	
#####	9:55:12	28	75.5		
#####	9:55:22	28.5	75.5		
#####	9:55:32	28.5	75.5		
#####	9:55:42	28.5	75		
#####	9:55:52	28.5	75		
#####	9:56:02	29	75		
#####	9:56:12	29	75		
#####	9:56:22	29	74.5		
#####	9:56:32	29	74		
#####	9:56:42	29	73.5		
#####	9:56:52	29	73.5		
#####	9:57:02	29	73.5		
#####	9:57:12	29.33	73		
#####	9:57:22	29.33	73		
#####	9:57:32	29.33	72.5		
#####	9:57:42	29.33	72		
#####	9:57:52	29.33	72		
#####	9:58:02	29.33	72		
#####	9:58:12	29.33	72		
#####	9:58:22	29.33	72		
#####	9:58:32	29.33	72		
#####	9:58:42	29.33	71.5		
#####	9:58:52	29.67	72		
#####	9:59:02	29.67	72		
#####	9:59:12	29.67	72		
#####	9:59:22	29.67	72		
#####	9:59:32	29.67	72		
#####	9:59:42	29.67	72		
#####	9:59:52	29.67	71.5		
#####	10:00:02	29.67	71.5		
#####	10:00:12	29.67	71.5		
#####	10:00:22	29.67	71		
#####	10:00:32	29.67	71		
#####	10:00:42	29.67	71		
#####	10:00:52	29.67	71		
#####	10:01:02	29.67	66		
#####	10:01:12	29.67	45		

ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวิธีพาราโรซานิลีน (Pararosaniline)

1.1 หลักการ

การตรวจวัดด้วยวิธีพาราโรซานิลีน (Pararosaniline) นี้มีหลักการคือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จากอากาศนั้น จะถูกจับไว้ในสารละลายของโปตัสเซียม หรือ โซเดียมเตตราคลอโรเมอร์คิวเรต (Potassium or Sodium Tetra Chloromercurate) ซึ่งเรียกรวมๆ ว่า TCM ซึ่งสารละลายเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากันจนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ 1, 2 - ไดคลอโรซัลไฟโตเมอร์คิวเรต (1, 2 - Dichloro Sulfitomercurate) ซึ่งเสถียรและไม่ถูกออกซิไดส์โดยออกซิเจน หรือออกซิแดนที่ที่แรง เช่น โอโซน และออกไซด์ของไนโตรเจน สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้นี้เมื่อเติมพาราโรซานิลีน (p - Rosaniline) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) จะเกิดสีของสารประกอบชื่อ พาราโรซานิลีน เมทิล ซัลฟอนิกแอซิด (Pararosaniline Methyl Sulfonic Acid) ที่สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องเทียบสีได้ ที่ความยาวคลื่น (Wavelength) 548 นาโนเมตร

1.2 พิสัยและความไว (Range and Sensitivity)

1.2.1 ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ใน 10 มิลลิลิตรของสารละลาย TCM เมื่อนำมาตรวจมีค่า 0.3 ไมโครลิตร ซึ่งเทียบเท่ากับ 0.01 พีพีเอ็ม (26 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในตัวอย่างอากาศ 30 ลิตร

1.2.2 กฎของ Beer จะใช้ได้ผลดีเมื่อความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์นี้มีค่าอยู่ใน ช่วงของ 0.1 – 1.0 หน่วยของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance Unit) หรือ 0 – 35 ไมโครกรัม ในสารละลายตัวอย่าง 25 มิลลิลิตร

1.3 สารรบกวน (Interference)

ออกไซด์ของไนโตรเจนจะถูกกำจัดเมื่อเติมกรดซัลฟามิก (Sulfamic Acid) สำหรับโอโซน (O_3) จะสลายตัวไปเองเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนโลหะหนักอื่นๆ กำจัดได้โดยการเติม EDTA (Ethylene Diamine Tetra Acetic Acid, Disodium Salt)

สารรบกวนต่างๆ ดังกล่าวนี้น่าจะเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกำจัดออกไปให้หมด เนื่องจากจะไปทำให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) เปลี่ยนกลายเป็นรูปอื่นไป ดังนั้นจึงเป็นผลให้ปริมาณของ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงมาก

1.4 ความแม่นยำและความถูกต้อง (Precision and Accuracy)

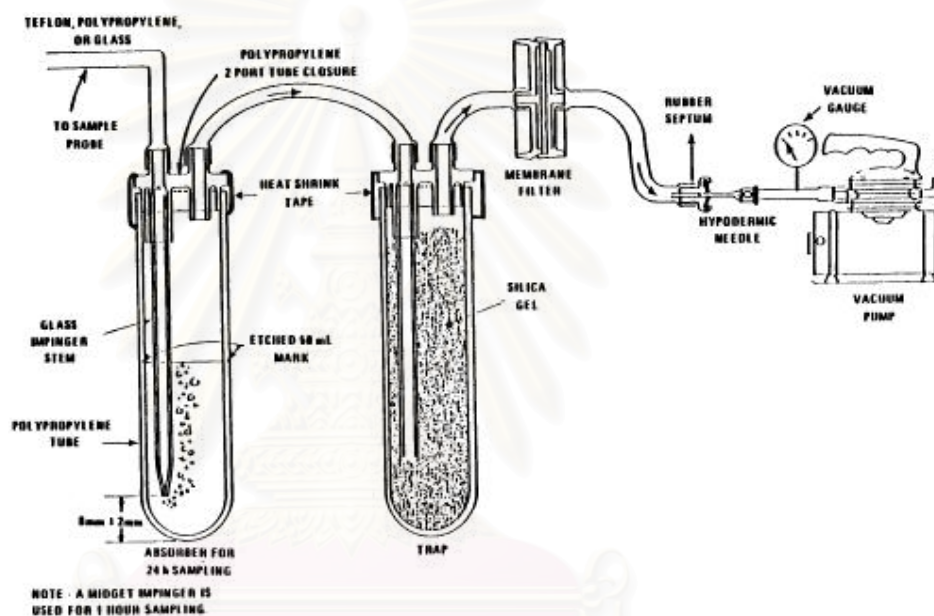
ความแม่นยำที่ค่า 95 % ของระดับความเชื่อถือ (95% Confidence Level) มีค่าเท่ากับ 4.6 เปอร์เซ็นต์

1.5 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1.5.1 เครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างอากาศ

เครื่องมือที่ใช้เก็บตัวอย่างอากาศ สำหรับการวิเคราะห์ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะใช้อุปกรณ์เครื่องมือดังนี้

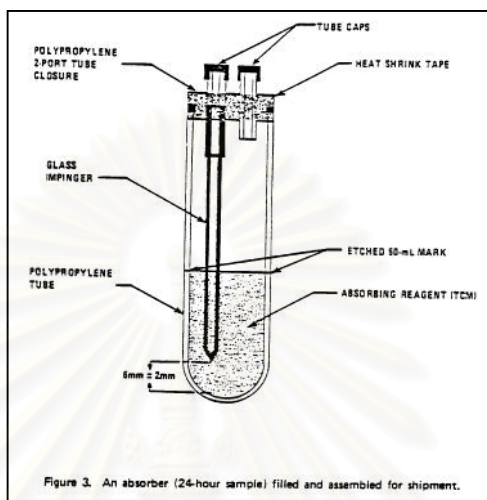
1.5.1.1 ส่วนของท่อเก็บตัวอย่าง (Sample Inlet) เป็นท่อทำด้วยเทฟลอน (Teflon) หรือ แก้ว (Glass) ปลายข้างหนึ่งต่อกับส่วนของตัวจับ ปลายข้างที่เหลือต่อกับกรวย โดยให้ปากกรวยคว่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำฝนเข้าไปในหลอดเก็บตัวอย่าง (ดังแสดงในรูปที่ ข.1.1)



รูปที่ ข.1.1 24 Hour sampling system

1.5.1.2 ส่วนของตัวจับ (Absorber) เป็นหลอดโพลีโพรพิลีน (Poly Propylene) ความยาว 164 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ฝาหลอดทำด้วยสารชนิดเดียวกัน และมีทางออก 2 ทาง (ไม่ใช่จุกยางเพราะจะได้ค่า Blank สูงและไม่คงที่) ส่วนที่เป็นทางออกจะต้องสวมพอดีกับหลอดแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน 6 มิลลิเมตร ความยาว 152 มิลลิเมตร ปลายข้างที่เหลือของหลอดแก้วเรียกว่าเป็นช่องเล็กๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 0.3-0.6 มิลลิเมตร ทางออกอีกทางหนึ่งจะเป็นส่วนที่ ต่อกับส่วนของตัวจับความชื้น เมื่อจะเก็บตัวอย่างต้องใส่สารละลายดูดกลืน TGS ลงไปใน หลอดปิดฝา ตรวจสอบว่าปลาย

ท่อหลอดแก้วอยู่ห่างจากก้นหลอดประมาณ 6 มิลลิเมตร และต้อง ไม่มีรอยร้าวตรงรอยต่อของทุกส่วน ด้วย ดังแสดงในรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 An absorber (24-hour sample) filled and assembled for shipment.

1.5.1.3 ส่วนดักจับความชื้น (Moisture Trap) ทั้งหลอดและฝาหลอดเป็นแบบเดียวกันกับส่วนของตัวจับ แต่ตรงทางออกที่ต่อกันนั้น มีหลอดแก้วปลายตรงขนาดเท่ากับหลอดแก้ว ปลายเรียวสวมอยู่ภายในหลอดมีใยแก้ว (Glass Wool) ที่ทำเป็นก้อนหลวมๆ หรือมีซิลิกาเจล (Silica Gel) บรรจุอยู่เพื่อดูดความชื้นไม่ให้หลงเหลือผ่านไปยังส่วนควบคุมอัตราการไหลได้ ทั้งนี้จะต้องเปลี่ยนใยแก้วหรือซิลิกาเจลใหม่ทุกครั้งที่เก็บตัวอย่าง

1.5.1.4 ส่วนของตัวกรองชนิดที่เป็นแผ่นเมมเบรน (Membrane Filter) จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และมีขนาดของรูพรุนที่อนุภาคขนาด 0.8-2.0 ไมโครเมตร สามารถผ่านไปได้ แผ่นกรองเมมเบรนนี้จะต้องไม่รั่วหรือขาด และควรเปลี่ยนแผ่นกรองนี้ หลังจากเก็บตัวอย่างอากาศทุกๆ 10 ตัวอย่าง แผ่นกรองนี้มีหน้าที่กรองอากาศของแข็งจำพวกอนุภาคฝุ่นละออง เพื่อป้องกันการอุดตันของส่วนควบคุมอัตราการไหลของอากาศ

1.5.1.5 ส่วนควบคุมอัตราการไหล (Flow Control Device) ต้องการให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 180-220 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตัวควบคุมอัตราการไหลที่นิยมใช้คือ เข็มฉีดยาหมายเลข 27 (Hypodermic Needle no.27) ความยาว 10 มิลลิเมตร หรือ 3/8 นิ้ว (ปัจจุบันใช้ Critical Orifice แทนเข็มฉีดยา)

1.5.1.6 ส่วนของเครื่องปั๊มอากาศ (Air Pump) เครื่องปั๊มอากาศที่ต้องดูดอากาศผ่าน ส่วนควบคุมอัตราการไหลที่ความดันบรรยากาศ 0.60 บรรยากาศ (atm) หรือ 456 ทอร์ (torr) (หรือมิลลิเมตรปรอท)

หมายเหตุ : หน่วยของความดัน

1 atm	=	1,013.25 มิลลิบาร์
	=	760 มิลลิเมตรปรอท (mm.Hg)
	=	760 ทอร์
	=	29.92126 นิ้วปรอท (inch.Hg)

1.5.1.7 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter) ซึ่งจะใช้ในตรวจสอบเทียบ (Calibrated) อัตราการไหลของอากาศให้มีค่าอยู่ระหว่าง 150-250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามที่ต้องการ

1.5.1.8 มาตรฐานสำหรับตรวจวัดอัตราการไหล (Flow Measurements Standard) ได้แก่ เครื่อง Wet Test Meter ชนิดที่มีความแม่นยำเป็นที่เชื่อถือได้ หรือเครื่อง Bubble Flow Meter หรือเครื่องมือที่เชื่อถือได้

1.5.2 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

1.5.2.1 เครื่องเทียบสี (Spectrophotometer) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 548 นาโนเมตร โดยใช้เซลล์ขนาด 1 เซนติเมตร

1.5.2.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

1.5.2.3 เครื่องแก้ว

- 1) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) 25, 50, 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 2) ปิเปต (Pipette) ขนาดความจุ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิลิตร
- 3) ถ้วยชั่งสารเคมี
- 4) บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 5) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 6) แท่งแก้วคนสารละลาย

1.6 สารเคมี

สารเคมีทุกตัวที่ใช้อย่างน้อยจะต้องเป็นเกรดงานวิเคราะห์ (Analytical Reagents, AR Grade, Reagent Grade)

1.6.1 น้ำกลั่น ใช้น้ำกลั่นที่ต้มให้เดือด และเย็นแล้ว และไม่มีสารออกซิเดนท์

- 1.6.2 ปะรอกคอลลอยด์ (Mercury Chloride, HgCl_2)
- 1.6.3 อีดีทีเอ (Ethylene Diamine Tetra Acetic Acid, EDTA)
- 1.6.4 โปแตสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride, KCl)
- 1.6.5 กรดซัลฟามิก (Sulfamic Acid, $\text{H}_3\text{NO}_3\text{S}$)
- 1.6.6 สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde, HCHO)
- 1.6.7 ไอโอดีน (Iodine, I_2)
- 1.6.8 สารละลายน้ำแป้ง (Starch Soluble, $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$)
- 1.6.9 โซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- 1.6.10 โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate, Na_2CO_3)
- 1.6.11 โซเดียมไอโอดेट (Sodium Iodate, NaIO_3)
- 1.6.12 โปแตสเซียมไอโอดด์ (Potassium Iodide, KI)
- 1.6.13 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)
- 1.6.14 โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ (Sodium Metabisulfite, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)
- 1.6.15 โซเดียมซัลไฟท์ (Sodium Sulfite, Na_2SO_3)
- 1.6.16 สารละลายพาราโรซานิลีนคลอไรด์ (Pararosaniline Chloride 0.2% in 1 M Hydrochloric acid, $\text{C}_{19}\text{H}_{18}\text{ClN}_3$)
- 1.6.17 กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid, H_3PO_4)
- 1.6.18 ปะรอกไอโอดด์ (HgI_2)
- 1.6.19 โปแตสเซียมไอโอดेट (KIO_3)
- 1.7. การเตรียมสารละลายสำหรับการตรวจวิเคราะห์
- 1.7.1 สารละลายดูดกลืนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Absorbing Solution for Sulfur dioxide)
 สารละลายที่ใช้คือ 0.04 โมลาร์ ของสารละลายโปแตสเซียมเตตราคลอโรเมอร์คิวเรต (Potassium Tetra Chloromercurate) เรียกว่า TCM เตรียมโดย ละลายปรอทคลอไรด์ (HgCl_2) 10.86 กรัม อีดีทีเอ (EDTA) 0.66 กรัม และ โปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl) 6.0 กรัม ในน้ำกลั่น เจือจางจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- 1.7.2 สารละลายกรดซัลฟามิก ความเข้มข้น 0.6%
 ละลายกรดซัลฟามิก 0.6 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร (สารละลายนี้ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้ง ที่ทำการทดลอง)

1.7.3 สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 0.2%

นำสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ที่มีความเข้มข้น 36 – 38 % มา 5 มิลลิลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร (สารละลายนี้ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำกรทดลอง)

1.7.4 สารละลายสต็อกของไอโอดีน ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ชั่งไอโอดีน 12.7 กรัม ในปิกรขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโปตัสเซียมไอโอดด์ (KI) 40 กรัม และน้ำกลั่นประมาณ 25 มิลลิลิตร คนจนสารทุกตัวละลายหมดแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

1.7.5 สารละลายอินดิเคเตอร์ของแป้ง (ชนิด Soluble Starch)

ละลาย 0.4 กรัมของแป้ง และ 0.002 กรัมของปรอทไอโอดด์ (HgI_2) ในน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย แล้วค่อยๆ เติมน้ำกลั่นที่เพิ่งเดือดลงไปจนได้ปริมาตรประมาณ 200 มิลลิลิตร นำไปต้มต่อจนสารที่ได้ละลายหมด ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนเก็บใส่ขวดแก้ว แล้วทำการปิดจุกอย่างดี

1.7.6 สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล

นำสารละลายสต็อกไอโอดีน ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (จากข้อ 7.4) มา 50 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

1.7.7 สารละลายสต็อกของโซเดียมไธโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 25.0 กรัม ในน้ำกลั่นที่เพิ่งต้มใหม่ และทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว 1,000 มิลลิลิตร แล้วเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.1 กรัม ลงไป ตั้งทิ้งไว้ 1 วัน ก่อนตรวจเช็คค่าความเข้มข้นที่แท้จริง โดยวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นที่แท้จริง ของสารละลายสต็อกของ โซเดียมไธโอซัลเฟต สามารถทำได้ดังนี้

1) ชั่งโปตัสเซียมไอโอดด์ (KIO_3) ที่ทำการอบให้แห้งที่ $180^\circ C$ นาน 1 – 2 ชั่วโมง จำนวน 1.5 กรัม (ซึ่งอย่างละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4) แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นจนได้ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2) ปิเปตสารละลายโปตัสเซียมไอโอดด์ในข้อ ก) จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมโปตัสเซียมไอโอดด์ (KI) 2.0 กรัม และ ไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ

3) ปิดจุกและตั้งทิ้งไว้ 5 นาที

4) สารละลายที่ผสมแล้วทำการไตเตรทกับสารละลายสต็อกโซเดียมไธโอซัลเฟต จนได้เป็นสีเหลืองจาง เติมน้ำแป้งลงไป 5.0 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ทำการไตเตรทต่อจนสีน้ำเงินหายไป

5) คำนวณหาความเข้มข้นที่แท้จริงของสารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟต โดยใช้สมการ

$$N = \frac{W}{V} \times 2.80$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นเป็น นอร์มัล ของสารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ต้องการทราบ
 V = ปริมาตรเป็น มิลลิลิตร ของสารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟตทั้งหมดที่ใช้ไตเตรท
 W = น้ำหนักเป็น กรัม ของโปตัสเซียมไฮโอเดตที่ใช้เตรียมสารละลาย

$$2.80 = \text{เป็นตัวเลขที่ได้จาก } \frac{10^3 \times 0.1}{35.67}$$

เมื่อ 10^3 เป็นตัวเลขที่ใช้เปลี่ยนหน่วยจาก กรัม เป็น มิลลิกรัม
 0.1 เป็นตัวเลขแสดงปริมาณโปตัสเซียมไฮโอเดตจากสารละลายทั้งหมด
 35.67 เป็นน้ำหนักสมมูลของโปตัสเซียมไฮโอเดต

1.7.8 สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล

นำสารละลายสต็อกโซเดียมไฮโอซัลเฟต (ในข้อ 7.7) จำนวน 100 มิลลิลิตร มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่เพิ่งต้มใหม่และทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว จนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

1.7.9 สารละลายซัลไฟท์

ละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 0.30 กรัม หรือ โซเดียมซัลไฟท์ (Na_2SO_3) 0.40 กรัม ในน้ำกลั่นที่ต้มใหม่ เย็นแล้ว จำนวน 500 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในช่วง 320 – 400 ไมโครกรัม/ มิลลิลิตร

1.7.10 สารละลายซัลไฟท์ - ทิซีเอ็ม (Sulfite - TCM)

ปิเปตสารละลายซัลไฟท์ (ในข้อ 7.9) จำนวน 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับ ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลาย TCM ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ (ข้อ 7.1) จนได้ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการตรวจเช็คปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสารละลายซัลไฟท์ - ทิซีเอ็ม ด้วยวิธีการไตเตรทย้อนกลับ

1.7.10.1 การคำนวณหาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสารละลายซัลไฟท์ - ทิซีเอ็ม โดยวิธีการไตเตรทย้อนกลับ (Back Titration)

1) ปิเปตสารละลายไฮโอไดน ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล (ในข้อ 7.6) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร 2 ใบ ใบละ 50 มิลลิลิตร

2) ขวดใบที่ 1 (A) เติมน้ำกลั่นลงไป 25 มิลลิลิตร ขวดใบที่ 2 (B) เติมสารละลายซัลไฟท์ (ในข้อ 7.9) ลงไป 25 มิลลิลิตร

3) ปิดจุกขวดทั้งสอง แล้วตั้งทิ้งไว้ 5 นาที

4) ไตเตรทสารละลาย ในขวดทั้งสอง (A และ B) ด้วยสารละลาย โซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล (ในข้อ 7.8) จนได้ สีเหลืองจาง เติมน้ำแบ่งจำนวน 5.0 มิลลิลิตร ลงในขวดทั้งสอง จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ทำการไตเตรทต่อจนได้สารละลายที่ไม่มีสี

5) คำนวณหาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม โดยใช้สมการ

$$\text{ไมโครกรัม SO}_2 / \text{มิลลิลิตร. ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม} = \frac{(A - B)(N)(32,000) \times 0.02}{25}$$

เมื่อ A = ปริมาตรเป็น มิลลิลิตร ของ 0.01 นอร์มัล โซเดียมไฮโอซัลเฟต ที่ใช้ในการไตเตรทขวด A

B = ปริมาตรเป็น มิลลิลิตร ของ 0.01 นอร์มัล โซเดียมไฮโอซัลเฟต ที่ใช้ในการไตเตรทขวด B

N = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ มีค่า = 0.01 นอร์มัล

32,000 = มิลลิกรัมสมมูล (Milligram equivalent) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

0.02 = อัตราส่วนของสารละลายซัลไฟท์ ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม

25 = ปริมาตร เป็น มิลลิลิตร ของสารละลายซัลไฟท์ที่ใส่อยู่ในขวด B

สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม นี้เก็บไว้ได้นาน 30 วัน ที่ 5°C แต่ถ้า ไม่ใส่ตู้เย็นที่ 5°C

ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้

(หมายเหตุ : ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม (ในข้อ 7.10) และการคำนวณหาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม (ในข้อ 7.10.1) ต้องทำพร้อมๆ กัน เพื่อจะได้ค่าของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่เป็นตัวแทนที่อยู่ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ที่ใกล้เคียงที่สุด)

1.7.11 สารละลายพาราโรซานีน

นำ 0.2 % ของสารละลายสำเร็จรูปของพาราโรซานีนใน 1.0 โมลาร์ของกรดเกลือ (HCl) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร เติมกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ จำนวน 25 มิลลิลิตรลงไป แล้วจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร สารละลายพาราโรซานีนที่เตรียมได้นี้จะมีอายุการใช้งานนาน 9 เดือน

(หมายเหตุ : ในกรณีที่ไม้ได้ใช้สารละลายสำเร็จรูปของพาราโรซานิลีนใน 1.0 โมลาร์ของกรดเกลือ ตั้งข้างต้นแล้ว หากแต่ใช้ Pararosaniline Dye ต้องสกัดเอาส่วนของพาราโรซานิลีนที่บริสุทธิ์ออกมา)

1.8 การสอบเทียบ (Calibration)

ก่อนการเก็บตัวอย่างและก่อนการวิเคราะห์ ควรต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือที่นำมาใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศ เครื่องวัดอัตราการไหล หลอดตัวจับ และเครื่องเทียบสี

1.8.1 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter)

1) ทำการสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศด้วยเครื่องมือมาตรฐาน เช่น Bubble Flow Meter หรือเครื่องมืออื่นที่เชื่อถือได้

2) ค่าอัตราการไหลของอากาศที่ได้ มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที (ที่ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท) ค่าอัตราการไหลควรอยู่ในช่วง 180-220 มิลลิลิตรต่อนาที

1.8.2 หลอดตัวจับ (Absorber)

1) ทำการเปรียบเทียบหลอดเก็บอากาศ (หลอดโพลีโพรพีลีน) โดยใช้ปิเปตแบบ กระเปาะแก้ว (Volumetric Pipette) ดูดน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดโพลีโพรพีลีน จากนั้นทำเครื่องหมาย ที่ระดับน้ำโดยดูจากส่วนเว้า

2) หรือปฏิบัติโดย ในการเก็บตัวอย่างอากาศ ใช้ปิเปตกระเปาะแก้วดูดสารละลาย ดูดกลั่น (Absorbing Solution) ทุกครั้งที่ทำการตรวจวิเคราะห์

1.8.3 เครื่องเทียบสี (Spectrophotometer)

เปิดสวิตซ์ไฟอุ่นเครื่องไว้อย่างน้อย 15 – 30 นาที ก่อนการวิเคราะห์และปรับเทียบเครื่องมือ ในหน่วยของ Transmittance และ Absorbance ตามคู่มือของเครื่อง

1.9 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Standard Calibration Curve)

1.9.1 เตรียมสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร ดังนี้

ขวดใบที่ 1 เติม 0.0 มิลลิลิตร สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม

ขวดใบที่ 2 เติม 0.5 มิลลิลิตร สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม

ขวดใบที่ 3 เติม 1.0 มิลลิลิตร สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม

ขวดใบที่ 4 เติม 2.0 มิลลิลิตร สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม

ขวดใบที่ 5 เติม 3.0 มิลลิลิตร สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม

ขวดใบที่ 6 เติม 4.0 มิลลิลิตร สารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม

จากนั้นให้เติมสารละลาย 0.04 โมลาร์ TCM ลงไปในขวดแต่ละใบตั้งแต่ใบที่ 1 ถึง ใบที่ 6 โดยให้ปริมาตรรวมของแต่ละใบเท่ากับ 10 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้การเตรียมสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม (ตามตารางที่ ข.1.1) ดังนี้

ตารางที่ ข 1.1 ปีเปตสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วปรับให้ปริมาตรรวมของแต่ละใบเท่ากับ 10 มิลลิลิตร ด้วย 0.04 โมลาร์ TCM

ลำดับที่	ปริมาตรสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม (มิลลิลิตร)	ปริมาตรสารละลาย 0.04 โมลาร์ TCM (มิลลิลิตร)
ขวดใบที่ 1	0.0	10.0
ขวดใบที่ 2	0.5	9.5
ขวดใบที่ 3	1.0	9.0
ขวดใบที่ 4	2.0	8.0
ขวดใบที่ 5	3.0	7.0
ขวดใบที่ 6	4.0	6.0

จากนั้นนำขวดใบที่ 1 ถึง 6 มาเติมสาร ดังนี้

- 0.6% ของสารละลายกรดซัลฟามิก จำนวน 1 มิลลิลิตร
- ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้ไนไตรท์สลายตัว
- 0.2% ของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ จำนวน 2 มิลลิลิตร
- สารละลายพาราโรซานิลีน 5 มิลลิลิตร
- ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จึงเติมน้ำกลั่น (ที่ต้มใหม่และเย็นแล้ว) ปรับปริมาตรให้ได้ 25 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้อีกประมาณ 30 – 60 นาที
- นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องเทียบสีที่ความยาวคลื่น 548 นาโนเมตร โดยใช้เซลล์ขนาด 1 เซนติเมตร ใช้น้ำกลั่นปรับจุด 0 ของเครื่อง และต้องควบคุมอุณหภูมิระหว่างการตรวจวิเคราะห์ ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน ± 2 องศาเซลเซียส

การพล็อตกราฟมาตรฐาน ให้แกน X = ความเข้มข้นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในหน่วยไมโครกรัม
และ ให้แกน Y = ค่าการดูดกลืนแสง

ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หาได้จากสมการ

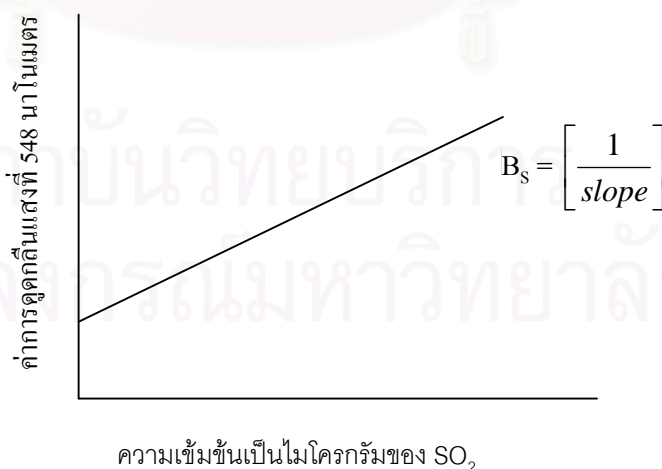
$$\text{ไมโครกรัม SO}_2 = \left[\begin{array}{c} \text{ไมโครกรัม SO}_2 / \text{มิลลิลิตร} \\ \text{ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{มิลลิลิตรของสารละลาย} \\ \text{ซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ที่เติมลงไป} \end{array} \right]$$

1.9.2 นำค่าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหน่วยไมโครกรัมที่คำนวณมาแล้วนี้ กับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จากการวิเคราะห์ของสารละลาย จากข้อใดที่ 1 - 6 ไปพล็อตกราฟ จะได้กราฟ ที่เรียกว่า กราฟมาตรฐาน (Standard Calibration Curve)

จากกราฟมาตรฐานซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ค่าที่ควรให้ความสำคัญ

- ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านจาก Blank (A_0) ต้องไม่เกิน 0.170 เมื่อใช้เซลล์ ขนาด 1 เซนติเมตร และ ควบคุมอุณหภูมิที่ 22 องศาเซลเซียส
- กราฟมาตรฐานที่ได้ต้องมีค่า 0.03 ± 0.002 หน่วยของการดูดกลืนแสง ซึ่งหมายความว่า สารละลายพาราโรซานิลินที่ใช้เติมลงไปนั้นมีความบริสุทธิ์พอ ถ้าไม่เป็นไปตามนี้ก็ควรเตรียมสารละลายสต็อกของพาราโรซานิลินใหม่ หรือไม่เช่นนั้นก็จำเป็นต้องทำ Blank ของสารเคมี (Reagent) ด้วยทุกครั้งที่ทำวิเคราะห์
- ในการคำนวณหาความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

จะใช้ส่วนกลับของความชัน $\left[\frac{1}{\text{slope}} \right]$ จากกราฟมาตรฐานมาคำนวณ



รูปที่ ข.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 548 นาโนเมตร และความเข้มข้นเป็นไมโครกรัมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.10 ขั้นตอนการดำเนินการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

1.10.1 การเก็บตัวอย่าง (Sample Collection)

1.10.1.1 ประกอบเครื่องมือให้พร้อม การเก็บก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะต้องควบคุมอุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่างให้อยู่ระหว่าง 7 – 17 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีส่วนทำความเย็น (Cooling Unit) ให้เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ และควรทำการหุ้มหลอดตัวจับด้วยแผ่นอลูมิเนียม (Aluminium Foil) เพื่อป้องกันแสงและป้องกันการสลายตัวของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.10.1.2 ใช้ปริมาตรของสารละลายดูดกลืน (Absorbing Solution) 0.04 โมลาร์ TCM จำนวน 50 มิลลิลิตร ต่อ 1 ตัวอย่าง ที่เก็บตัวอย่างนาน 24 ชั่วโมง (หรือ จำนวน 25 มิลลิลิตร ต่อ 1 ตัวอย่างนาน 30 – 60 นาที) ลงในหลอดตรวจจับ

1.10.1.3 ในส่วนของตัวเครื่อง ณ ส่วนที่ต่อกับกรวย ให้ต่อเครื่องวัดอัตราการไหล โดย ดึงกรวยออก จากนั้นเปิดปั๊ม วัดค่าอัตราการไหลของอากาศ บันทึกไว้เป็น F_1 (ปรับอัตราการไหลของอากาศให้อยู่ในช่วง 180-220 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)

1.10.1.4 เปิดปั๊มติดต่อกันนาน 24 ชั่วโมง บันทึกเวลาที่เก็บเป็นนาที (ts)

1.10.1.5 วัดค่าอัตราการไหลของอากาศหลังการเก็บตัวอย่าง โดยวิธีเดียวกันกับการเริ่มเก็บตัวอย่างบันทึกค่าเป็น F_2

1.10.1.6 ปิดหลอดให้แน่น ปิดฉลาก ส่งเข้าห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์ต่อไป (ถ้าไม่ได้ทำการวิเคราะห์ทันที ควรเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส)

1.10.2 การวิเคราะห์ (Analysis)

1.10.2.1 ถ้าตัวอย่างมีตะกอนต้องเข้าเครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) ก่อน

1.10.2.2 ถ่ายตัวอย่างที่เก็บใส่ขวดปรับปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร ล้างหลอดตัวจับด้วยน้ำกลั่นประมาณ 1 – 5 มิลลิลิตร จนได้ปริมาตรครบ 50 มิลลิลิตร (สำหรับในตัวอย่างก๊าซ ที่เก็บ 30 – 60 นาที ให้ถ่ายตัวอย่างที่เก็บใส่ขวดปรับปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร)

1.10.2.3 ตั้งทิ้งไว้ 20 นาที เพื่อให้ไอโซนสลายตัวไป

1.10.2.4 ตัวอย่างอากาศที่ตั้งทิ้งไว้ให้ไอโซนสลายตัวแล้ว ให้ทำการวิเคราะห์ ดังนี้

1) ปิเปตสารละลายตัวอย่าง จำนวน 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นทำเช่นเดียวกับการเตรียมกราฟมาตรฐาน คือ

2) เติมสารละลายดูดกลืน ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ TCM ลงไปให้ได้ ปริมาตรในขวด 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

3) เติม 0.6% ของกรดซัลฟามิก ลงไปจำนวน 1 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้ไนไตรท์สลายตัว

4) เติม 0.2% ของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ จำนวน 2 มิลลิลิตร และสารละลายพาราโรซานีน 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที

5) เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 – 60 นาที ก่อนนำไป วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องเทียบสีที่ความยาวคลื่น 548 นาโนเมตร

1.10.2.5 บันทึกค่าการดูดกลืนแสง (A) ที่อ่านได้

1.10.2.6 จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสง (A) ที่อ่านค่าได้นี้ ไปคำนวณหาความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในตัวอย่างต่อไป

1.10.2.7 เตรียม Blank โดยใช้สารละลายดูดกลืน 0.04 โมลาร์ ของ TCM จำนวน 10 มิลลิลิตร แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง บันทึกค่าการดูดกลืนแสง (A_0)

1.11 การคำนวณ

1.11.1 คำนวณหาปริมาตรอากาศที่เก็บได้

จากสมการ

$$V = \frac{F_1 + F_2}{2} \times t_s \times 10^{-3}$$

เมื่อ V = ปริมาตรอากาศ (ลิตร) ทั้งหมดที่เก็บตัวอย่าง

F_1 และ F_2 = ค่าอัตราการไหลของอากาศก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง (มิลลิลิตร/นาที)

t_s = ระยะเวลา (นาที) ที่เก็บตัวอย่าง

10^{-3} = ตัวเลขที่ใช้เปลี่ยนหน่วยจาก มิลลิลิตร เป็น ลิตร

1.11.2 เปลี่ยนปริมาตรอากาศทั้งหมดที่เก็บตัวอย่างให้เป็นปริมาตรที่ STP

จากสมการ

$$V_s = \frac{PV}{(t - 273) K} \times \frac{298 K}{1,013.25 \text{ มิลลิบาร์}}$$

โดยที่ V_s = ปริมาตรอากาศ (ลิตร) ที่ STP (25 องศาเซลเซียส, 1,013.25 มิลลิบาร์)

P = ความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์, mb) ขณะทำการเก็บตัวอย่าง

V = ปริมาตรอากาศที่เก็บทั้งหมด (ลิตร)

t = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ขณะเก็บตัวอย่าง

1.11.3 คำนวณหาความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในตัวอย่าง ในหน่วย ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากสมการ

$$\text{ไมโครกรัม SO}_2 \text{ / ลูกบาศก์เมตร} = \frac{(A - A_0)(10^3)(B_s) \times D}{V_s}$$

- โดยที่
- A = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่วัดได้
 - A₀ = ค่าการดูดกลืนแสงของ Blank ที่วัดได้
 - B_s = ส่วนกลับของ Slope ของกราฟมาตรฐาน = $\left[\frac{1}{\text{slope}} \right]$
 - D = ค่า Dilution Factor (D = 1 สำหรับตัวอย่างที่เก็บ 30 – 60 นาที, D = 10 สำหรับตัวอย่างที่เก็บ 24 ชั่วโมง)
 - 10³ = ตัวเลขที่ใช้เปลี่ยนหน่วยจาก ต่อลิตร เป็น ต่อลูกบาศก์เมตร

1.11.4 คำนวณหาความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในหน่วย พีพีเอ็ม (ppm)

จากสมการ

$$\text{พีพีเอ็ม SO}_2 = (\text{ไมโครกรัม SO}_2 \text{ / ลูกบาศก์เมตร}) \times (3.82 \times 10^{-4})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการตรวจวัดด้วยวิธีพาราโรซานีน ได้ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยมีรายละเอียดของการตรวจวัดดังนี้

ตารางที่ ข 2.1 แสดงค่าจากการเก็บตัวอย่างในพื้นที่ศึกษาก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

พารามิเตอร์	ค่าการตรวจวัด
เก็บต่อเนื่อง	24 ชั่วโมง
อัตราการไหลก่อนเก็บ, (F ₁)	185 มิลลิลิตรต่อนาที
อัตราการไหลหลังเก็บ, (F ₂)	183 มิลลิลิตรต่อนาที
อุณหภูมิเฉลี่ยขณะเก็บ, (t)	27 องศาเซลเซียส
ความดันขณะเก็บตัวอย่าง, (P)	1,005 มิลลิบาร์

ตารางที่ ข 2.2 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ใน สารละลาย ซัลไฟท์-ทึซซีเอ็ม

พารามิเตอร์	ค่าการตรวจวัด
ปริมาตร 0.01 N โซเดียมไฮโอซัลเฟต ที่ใช้ในการไตเตรทขวด A , (A)	45.93 มิลลิลิตร
ปริมาตร 0.01 N โซเดียมไฮโอซัลเฟต ที่ใช้ในการไตเตรทขวด B , (B)	16.13 มิลลิลิตร
ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโอซัลเฟต (N)	0.01 นอร์มัล

$$\begin{aligned}
 \text{จาก ไมโครกรัม SO}_2 \text{ /มิลลิลิตร.ในสารละลายซัลไฟท์-ทึซซีเอ็ม} &= \frac{(A - B)(N)(32,000) \times 0.02}{25} \\
 &= \frac{(45.93 - 16.13)(0.01)(32,000)(0.02)}{25} \\
 &= 7.6288
 \end{aligned}$$

จาก สมการ

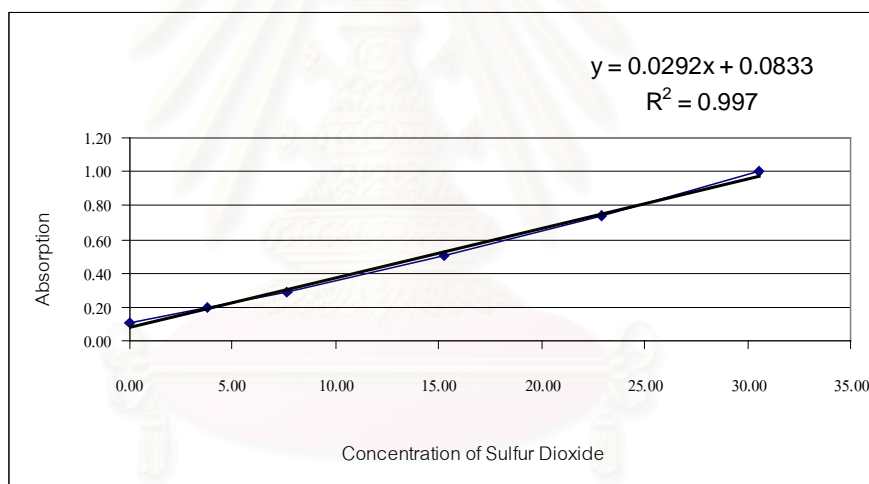
$$\text{ไมโครกรัม SO}_2 = \left[\begin{array}{c} \text{ไมโครกรัม SO}_2 \text{ / มิลลิลิตร} \\ \text{ในสารละลายซัลไฟท์ - ทึซซีเอ็ม} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{มิลลิลิตรของสารละลาย} \\ \text{ซัลไฟท์ - ทึซซีเอ็ม ที่เติมลงไป} \end{array} \right]$$

สามารถสรุปค่าไมโครกรัมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นตารางได้ ดังตารางที่ ข 2.3

ตารางที่ ข 2.3 แสดงค่าไมโครกรัมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ขวดใบที่	ไมโครกรัม SO ₂ / มิลลิลิตร ในสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม	มิลลิลิตร ของสารละลายซัลไฟท์ - ทีซีเอ็ม ที่เติมลงไป	ไมโครกรัม SO ₂
1	7.6288	0.0	0.0000
2	7.6288	0.5	3.8144
3	7.6288	1.0	7.6288
4	7.6288	2.0	15.2576
5	7.6288	3.0	22.8864
6	7.6288	4.0	30.5152

แล้วนำค่าที่ได้นี้มาพล็อตกราฟ ได้ดังรูปที่ ข 2.1



รูปที่ ข 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ดังนั้น จากกราฟจึงได้ค่าส่วนกลับของ Slope เท่ากับ 34.2086

ตารางที่ ข 2.4 แสดงค่าจากการวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ โดย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นที่ 548 นาโนเมตร

พารามิเตอร์	ค่าการดูดกลืนแสง
ค่าการดูดกลืนแสงของ Blank (A_0)	0.0950
ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (A) วันที่ 17 ธ.ค.2547	0.1090
ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (A) วันที่ 18 ธ.ค.2547	0.1152
ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (A) วันที่ 19 ธ.ค.2547	0.1187

นำค่าการตรวจวัดจากตารางที่ ข 2.1 และตารางที่ ข 2.4 มาทำการคำนวณหาปริมาณ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้ดังนี้

(1) ปริมาตรอากาศที่เก็บทั้งหมด (สมการที่ 3.5)

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{F_1 + F_2}{2} \times t_s \times 10^{-3} \\
 &= \frac{185 + 183}{2} \times (24 \times 60) \times 10^{-3} \\
 &= 264.96 \text{ ลิตร}
 \end{aligned}$$

(2) เปลี่ยนปริมาตรอากาศทั้งหมดที่เก็บตัวอย่างเป็นปริมาตรที่ STP

(จากสมการที่ 3.6)

$$\begin{aligned}
 V_s &= \frac{PV}{(t + 273) \text{ K}} \times \frac{298 \text{ K}}{1,013.25 \text{ มิลลิบาร์}} \\
 &= \frac{1,005 \times 264.96}{(27 + 273)} \times \frac{298}{1,013.25} \\
 &= 258.47 \text{ ลิตร}
 \end{aligned}$$

(3) คำนวณหาความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในตัวอย่าง
(จากสมการที่ 3.7) ยกตัวอย่างการคำนวณของวันที่ 17 ธันวาคม 2547

$$\begin{aligned} \text{ไมโครกรัม SO}_2 / \text{ลูกบาศก์เมตร} &= \frac{(A - A_0)(10^3)(B_s) \times D}{V_s} \\ &= \frac{(0.1090 - 0.0950)(10^3)(34.2086) \times 10}{258.47} \\ &= 18.8970 \text{ ไมโครกรัม / ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

(4) คำนวณหาความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในหน่วย พีพีบี (ppb)
หรือส่วนในพันล้านส่วน จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{พีพีบี SO}_2 &= (\text{ไมโครกรัม SO}_2 / \text{ลูกบาศก์เมตร}) \times (3.82 \times 10^{-1}) \\ &= 18.8970 \times (3.82 \times 10^{-1}) \\ &= 7.0781 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข 2.5 ผลการตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในพื้นที่ศึกษา

วันที่	ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์(ppb)
18-Dec-03	7.0781
19-Dec-03	10.2127
20-Dec-03	11.9822

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.1 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การกัดกร่อน

เป็นตัวอย่างของการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกัดกร่อน จากค่าที่ได้ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ในงานอูฐยามรดกโลก เท่ากับ 9.7577 ส่วนในพันล้านส่วน โดยระยะเวลาการจัดงาน 9 วัน จากข้อมูลนี้สามารถนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ได้ผลการคำนวณดังนี้

1) อีฐู่เก่า

$$\text{จากสมการ } C.R. = (2.798 \times 10^{-3}) + [(9.419 \times 10^{-5}) C] + [(2.973 \times 10^{-3}) T] \quad \dots(4.4)$$

เมื่อ C.R. = อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซ็นต์

C = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน

T = เวลา, สัปดาห์

เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

$$C.R. = (2.798 \times 10^{-3}) + [(9.419 \times 10^{-5}) (9.7577 \times 10^{-3})] + [(2.973 \times 10^{-3}) \left(\frac{9}{7}\right)]$$

$$= 0.006621 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

นั่นคืออีฐู่เก่ามีอัตราการกัดกร่อน 6.6210×10^{-3} เปอร์เซ็นต์

2) อีฐู่ปัจจุบัน

$$\text{จากสมการ } C.R. = (3.238 \times 10^{-3}) + [(2.055 \times 10^{-5}) C] + [(4.427 \times 10^{-4}) T] \quad \dots(4.5)$$

เมื่อ C.R. = อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซ็นต์

C = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน

T = เวลา, สัปดาห์

เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

$$C.R. = (3.238 \times 10^{-3}) + [(2.055 \times 10^{-5}) (9.7577 \times 10^{-3})] + [(4.427 \times 10^{-4}) \left(\frac{9}{7}\right)]$$

$$= 0.003807$$

นั่นคืออีฐู่ปัจจุบันมีอัตราการกัดกร่อน 3.8070×10^{-3} เปอร์เซ็นต์

3) ปูนปั้นเก่า

$$\text{จากสมการ } C.R. = (1.080 \times 10^{-3}) + [(7.720 \times 10^{-4}) C] + [(5.590 \times 10^{-2}) T] \quad \dots(4.6)$$

- เมื่อ C.R. = อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซ็นต์
 C = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน
 T = เวลา, สัปดาห์

เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

$$C.R. = (1.080 \times 10^{-2}) + [(7.720 \times 10^{-4}) (9.7577 \times 10^{-3})] + [(5.590 \times 10^{-2}) \left(\frac{9}{7}\right)]$$

$$= 0.061078$$

นั่นคือปูนปั้นเก่ามีอัตราการกัดกร่อน 6.1078×10^{-2} เปอร์เซ็นต์

4) ปูนปั้นปัจจุบัน

$$\text{จากสมการ } C.R. = (6.501 \times 10^{-4}) + [(5.059 \times 10^{-4}) C] + [(2.205 \times 10^{-2}) T] \quad \dots(4.7)$$

- เมื่อ C.R. = อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซ็นต์
 C = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ส่วนในล้านส่วน
 T = เวลา, สัปดาห์

เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

$$C.R. = (6.501 \times 10^{-3}) + [(5.059 \times 10^{-4}) (9.7577 \times 10^{-3})] + [(2.205 \times 10^{-2}) \left(\frac{9}{7}\right)]$$

$$= 0.021854$$

นั่นคือปูนปั้นปัจจุบันมีอัตราการกัดกร่อน 2.1854×10^{-2} เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2 การคำนวณความลึกของการกัดกร่อน

(1) สูตรคำนวณความลึกของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น สามารถแสดงวิธีการคำนวณได้ดังนี้

ในกรณีที่วัตถุที่ทดลองมีเนื้อเดียว และมีรูปทรงเป็นลูกบาศก์

คิดเทียบจากพื้นที่ผิวสัมผัส $= 2.5 \times 2.5 \times 5 = 31.25$ ตารางเซนติเมตร

ดังนั้น พื้นที่สัมผัส 31.25 ตารางเซนติเมตร เกิดการกัดกร่อน C.T. เปอร์เซ็นต์

ถ้า พื้นที่สัมผัส A.E. ตารางเซนติเมตร จะกัดกร่อน $= \frac{C.T. \times A.E.}{31.25 \times 100}$ เปอร์เซ็นต์

จะได้เปอร์เซ็นต์การกัดกร่อนเทียบกับพื้นที่สัมผัส A.E. ($C.T_{(A.E)}$)

$$C.T_{(A.E)} = \frac{C.T. \times A.E. \text{ เปอร์เซ็นต์}}{31.25 \times 100}$$

ให้ความหนาแน่น เท่ากับ D กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

นั่นคือ วัสดุปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีน้ำหนัก D กรัม

ถ้า วัสดุปริมาตร $V_{(วัสดุ)}$ ลูกบาศก์เซนติเมตรมีน้ำหนัก $D \times V_{(วัสดุ)}$ กรัม

เมื่อเกิดการกัดกร่อนจะมีน้ำหนักหายไป $= \frac{D \times V_{(วัสดุ)} \times C.T_{(A.E)}}{100}$ กรัม

ดังนั้นหลังการกัดกร่อนจะมีปริมาตรหายไป $V_{(กัดกร่อน)}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

จาก $D = m / v$

เมื่อแทนค่า จะได้ $D = \frac{D \times V_{(วัสดุ)} \times C.T_{(A.E)}}{V_{(กัดกร่อน)} \times 100}$

นั่นคือ $V_{(กัดกร่อน)} = \frac{V_{(วัสดุ)} \times C.T_{(A.E)}}{100}$

จาก ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร) = พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร) x ความสูง (เซนติเมตร)

ดังนั้น ความลึกของการกัดกร่อน (D.C.) =
$$\frac{V_{(วัสดุ)} \times C.T_{(A.E)}}{A.E. \times 100}$$

$$D.C. = \frac{V_{(วัสดุ)} \times C.T_{(A.E)}}{A.E. \times 100}$$

เมื่อ D.C. คือ ความลึกของการกัดกร่อน, เซนติเมตร
 A.E. คือ พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ตารางเซนติเมตร
 $V_{(วัสดุ)}$ คือ ปริมาตรของวัสดุ, ลูกบาศก์เซนติเมตร
 $C.T_{(A.E)}$ คือ เปอร์เซ็นต์อัตราการกัดกร่อนเทียบกับพื้นที่สัมผัส A.E., เปอร์เซ็นต์

$$\text{โดยคำนวณจาก } C.T_{(A.E)} = \frac{C.T. \times A.E.}{31.25 \times 100}$$

C.T. คือ อัตราการกัดกร่อนเดิม, เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(2) ตัวอย่างการคำนวณความลึกของการกัดกร่อน

เป็นตัวอย่างของการคำนวณหาความลึกที่ถูกกัดกร่อนไป โดยคำนวณต่อจากค่าที่ได้ทำการคำนวณในภาคผนวก ค.1 โดยสมมติให้ พื้นที่ผิวของวัสดุสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เท่ากับ 100 ตารางเมตร หรือ 1,000,000 ตารางเซนติเมตร จากข้อมูลนี้สามารถนำมาคำนวณหาความลึกของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ได้ผลการ คำนวณดังนี้

$$\text{จากสมการ} \quad D.C. = \frac{1}{D} \times \frac{1 \times C.R.}{100} \times \frac{1}{A.E.}$$

เมื่อ	D.C.	คือ	ความลึกของการกัดกร่อน, เซนติเมตร
	A.E.	คือ	พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ตารางเซนติเมตร
	C.R.	คือ	เปอร์เซ็นต์อัตราการกัดกร่อน, เปอร์เซ็นต์
	D	คือ	ความหนาแน่นของวัสดุ, กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

1) อีฐูเก่า

เมื่อ อีฐูเก่า มีความหนาแน่น = 2.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ C.R. = 0.006621 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการได้} \quad D.C. &= \frac{1}{2.1} \times \frac{1 \times 0.006621}{100} \times \frac{1}{10^6} \\ &= 3.153 \times 10^{-11} \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

นั่นคือพื้นที่ผิวของอีฐูเก่าจะถูกกัดกร่อน หรือถูกทำลายลงไป 3.153×10^{-11} เซนติเมตร

2) อีฐูปัจจุบัน

เมื่อ อีฐูเก่า มีความหนาแน่น = 1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ C.R. = 0.003807 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการได้} \quad D.C. &= \frac{1}{1.8} \times \frac{1 \times 0.003807}{100} \times \frac{1}{10^6} \\ &= 2.1152 \times 10^{-11} \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

นั่นคือพื้นที่ผิวของอีฐูเก่าจะถูกกัดกร่อน หรือถูกทำลายลงไป 2.1152×10^{-11} เซนติเมตร

3) ปูนปั้นเก่า

เมื่อ อิฐเก่า มีความหนาแน่น = 1.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ C.R. = 0.061078 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการได้} \quad \text{D.C.} &= \frac{1}{1.9} \times \frac{1 \times 0.061078}{100} \times \frac{1}{10^6} \\ &= 3.2146 \times 10^{-10} \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

นั่นคือพื้นที่ผิวของอิฐเก่าจะถูกกัดกร่อน หรือถูกทำลายลงไป 3.2146×10^{-10} เซนติเมตร

4) ปูนปั้นปัจจุบัน

เมื่อ อิฐเก่า มีความหนาแน่น = 2.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ C.R. = 0.021854 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการได้} \quad \text{D.C.} &= \frac{1}{2.0} \times \frac{1 \times 0.021854}{100} \times \frac{1}{10^6} \\ &= 1.0927 \times 10^{-10} \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

นั่นคือพื้นที่ผิวของอิฐเก่าจะถูกกัดกร่อน หรือถูกทำลายลงไป 1.0927×10^{-10} เซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว พัชรวิไล พงษ์พานิช เกิดเมื่อวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดขอนแก่น จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เมื่อปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย