



การประมาณค่าผลกระทบจากมลพิษทางอากาศต่อการสีกร่อนของโบราณสถานในกรุงเทพมหานคร



โดย  
นางสาวณัฐชา แดงประทุม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 1 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การประมาณค่าผลกระทบจากมลพิษทางอากาศต่อการสีกร่อนของโบราณสถานใน  
กรุงเทพมหานคร



โดย  
นางสาวณัฐชา แดงประทุม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 1 ระดับปริญญามหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ESTIMATION OF AIR POLLUTION EFFECT ON CORROSION OF HISTORICAL  
BUILDINGS IN BANGKOK



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)  
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2022  
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การประมาณค่าผลกระทบจากมลพิษทางอากาศต่อการสีกร่อน  
ของโบราณสถานในกรุงเทพมหานคร  
โดย นางสาวณัฐชา แดงประทุม  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 1 ระดับปริญญา  
มหาบัณฑิต  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. รัฐพล อ้นแอ่ง

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

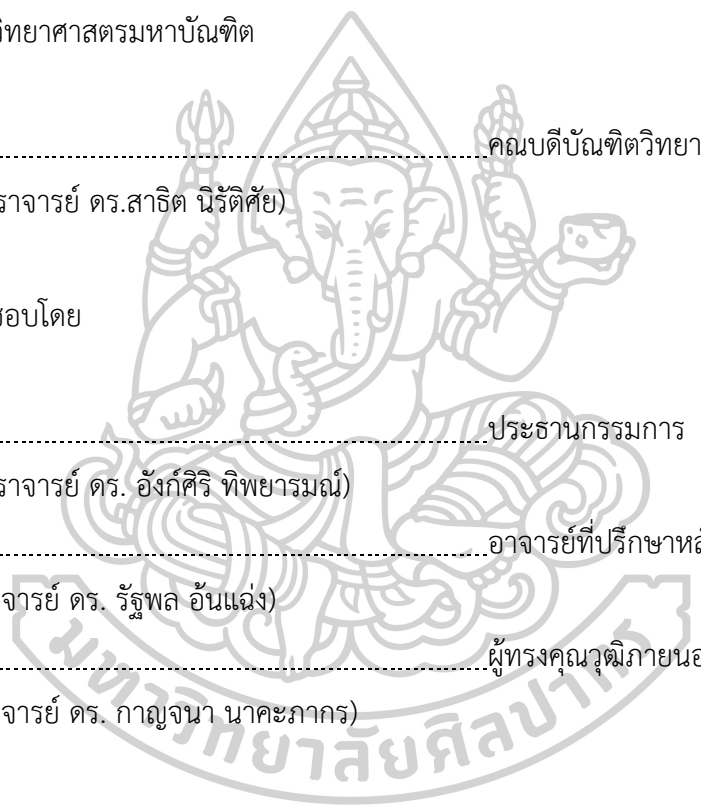
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (ผู้รักษาการแทน)  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาธิต นีรัตศัย)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังค์ศิริ ทิพยารมณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัฐพล อ้นแอ่ง)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจนา นาคะภากร)



620720055 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 1 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : กรุงเทพมหานคร, การประมาณค่าเชิงพื้นที่, การสีกร่อน, โบราณสถาน, มลพิษทางอากาศ, ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

นางสาว ณิชชา แดงประทุม: การประมาณค่าผลกระทบจากมลพิษทางอากาศต่อการสีกร่อนของโบราณสถานในกรุงเทพมหานคร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. รัฐพล อ้นแฉ่ง

โบราณสถานซึ่งเป็นมรดกทางวัฒนธรรมอันทรงคุณค่าของชาติ อาจประสบปัญหาการเสื่อมสภาพของวัสดุอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากการได้รับสัมผัสมลพิษทางอากาศ การวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ร่วมกับฟังก์ชันการสีกร่อนของวัสดุ (Dose response functions: DRFs) ในการประมาณค่าการสีกร่อนของวัสดุโบราณสถาน 5 ชนิด ได้แก่ วัสดุทองแดง หินปูนพอร์ตแลนด์ เหล็กกล้าคาร์บอน สังกะสี และสัมฤทธิ์หล่อ และความเสี่ยงต่อการสีกร่อนของโบราณสถานในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยในขั้นแรกได้ทำการหาวิธีการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมโดยเทียบกับข้อมูลจากการตรวจวัดมลพิษทางอากาศ ในปี พ.ศ. 2553-2562 จากสถานีตรวจวัดจำนวน 26 สถานี ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและพื้นที่ใกล้เคียง ร่วมกับตัวชี้วัดทางสถิติ ผลการศึกษาพบว่า วิธี Inverse Distance Weighting (IDW) เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด จากอีก 3 วิธี คือ Spline Kriging (Ordinary) และ Kriging (Universal) ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษ ( $\text{SO}_2$   $\text{NO}_2$  และ  $\text{O}_3$ ) ในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2562 มีแนวโน้มลดลงจากปี พ.ศ. 2553 ยกเว้น  $\text{PM}_{10}$  อย่างไรก็ตามจากการคาดการณ์ความเข้มข้นของมลพิษเชิงพื้นที่พบว่ามลพิษทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2571 ผลการประมาณค่าการสีกร่อนของวัสดุโบราณสถานเชิงพื้นที่ พบว่า ในปี พ.ศ. 2553 ค่าการสีกร่อนของวัสดุโบราณสถานอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทุกชนิด ยกเว้น สังกะสีและสัมฤทธิ์หล่อ ในปี พ.ศ. 2562 และ พ.ศ. 2571 ค่าการสีกร่อนของวัสดุโบราณสถานทุกชนิดในพื้นที่ศึกษาเพิ่มสูงขึ้นจนเกินกว่าอัตราการสีกร่อนที่ยอมรับได้ และมีความเสี่ยงในการสีกร่อนอย่างรุนแรงในปี พ.ศ. 2571 ระยะเวลาการสัมผัสมลพิษทางอากาศมีแนวโน้มที่จะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสีกร่อนของวัสดุโบราณสถาน ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนกำหนดมาตรการเชิงรุก เพื่อหาแนวทางในการลดอัตราการสีกร่อนของโบราณสถานในพื้นที่กรุงเทพมหานครต่อไปได้

620720055 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : Air pollution; Bangkok; Corrosion; Geographic information systems (GIS);

Historical buildings; Spatial interpolation

MISS NUTTACHA DAENGRATHUM : ESTIMATION OF AIR POLLUTION EFFECT ON CORROSION OF HISTORICAL BUILDINGS IN BANGKOK THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR RATTAPON ONCHANG, Ph.D.

Historical buildings are recognized as the valuable cultural heritage of a nation. They may suffer material deterioration unavoidably because of exposure to air pollution. This study used geographic information systems with dose-response functions (DRFs) to estimate the corrosion of five materials namely; copper, Portland limestone, carbon steel, zinc, and cast bronze. Their corrosion risks with regard to historical buildings in Bangkok were also examined. The first step was to find a suitable spatial interpolation method by comparing with observed air pollution and meteorological measurement data for 2010–2019 from 26 monitoring stations in Bangkok and its neighborhood with applying statistical performance measures. It reveals that the inverse distance weighting (IDW) was found to be the most suitable method among other three methods including Spline, Kriging (Ordinary) and Kriging (Universal). The concentrations of all pollutants in Bangkok, except PM<sub>10</sub>, decreased from 2010 to 2019. However, the prediction shows that all pollutants turn to increase in 2028. The results of spatial corrosion estimations indicated that in 2010, the corrosion of all materials were at acceptable levels, except for zinc and cast bronze. The estimated corrosion levels for 2019 and 2028 indicates that all materials in study area exceed their tolerable corrosion rates with considerably serious risks in 2028. Air pollution exposure time duration tends to be a key factor affecting the corrosion of materials. The results can be further used to establish active measures to reduce the rate of corrosion of historical buildings in Bangkok.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีโดยได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุน การวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2564 และได้รับความ เมตตาจากอาจารย์หลาย ๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล อันแย้ง อาจารย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรประภา ภูมิเมกาญจนะ โรแบร์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะของการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการหาแนวทางแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในระหว่าง การดำเนินการวิจัย ตลอดจนการตรวจรายละเอียดต่าง ๆ ในการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์อันเป็นประโยชน์ยิ่ง สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังก์ศิริ ทิพยารมณ ที่กรุณาสละเวลาเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา นาคะภากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ กรุณาเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณกรมควบคุมมลพิษที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลคุณภาพอากาศและ อนุชนิยมวิทยา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การ ดำเนินเอกสารข้อมูล และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ครู อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ทั้งหลายแก่ผู้วิจัย และที่สำคัญที่สุดคือ คุณพ่อสุพจน์ และคุณแม่อรนุช แดงประทุม รวมถึงทุกคนใน ครอบครัวที่เป็นกำลังใจพร้อมสนับสนุนและเป็นแรงผลักดันตลอดมา ขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนทุก ๆ คนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

นางสาว ญัฐชา แดงประทุม

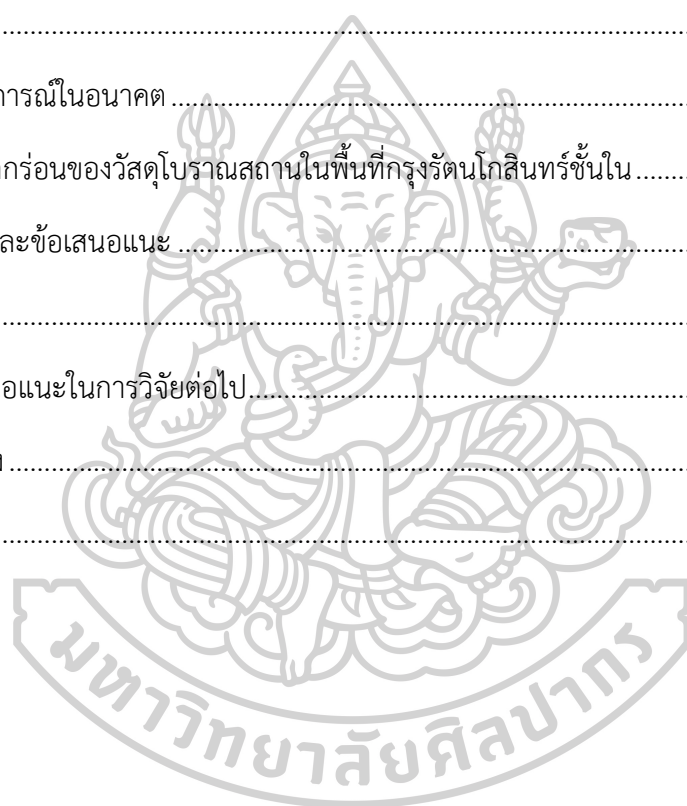
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.1 เกาะกรุงรัตนโกสินทร์ .....	5
2.2 โบราณสถาน.....	6
2.3 การสีกร่อนของโบราณสถาน.....	6
2.4 ฟังก์ชันการสีกร่อนของวัสดุ .....	8
2.5 เทคนิคการวิเคราะห์อัตราการสีกร่อนที่ยอมรับได้ .....	13
2.6 ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ .....	16
2.7 การประมาณค่าเชิงพื้นที่ .....	16
2.7.1 Inverse Distance Weighting (IDW).....	17
2.7.2 Spline.....	18
2.7.3 Kriging .....	19



2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	31
3.1 ข้อมูล อุปกรณ์ และซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำการวิจัย .....	31
3.1.1 ข้อมูลหุติยภูมิ .....	31
3.1.1.1 ข้อมูลเชิงพื้นที่.....	31
3.1.1.2 ข้อมูลคุณลักษณะ.....	31
3.1.2 อุปกรณ์ และซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำการวิจัย.....	31
3.2 ขั้นตอนการศึกษา.....	33
3.2.1 การดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลหุติยภูมิ .....	33
3.2.1.1 ข้อมูลสภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดของกรุงเทพมหานคร ช่วงปี พ.ศ. 2553-2562 .....	33
3.2.1.2 ข้อมูลโบราณสถาน .....	33
3.2.2 ประเมินค่าเชิงพื้นที่ของความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศแต่ละชนิดในแต่ละสถานีตรวจวัดด้วยเทคนิค Interpolation.....	33
3.2.3 พิจารณาคัดเลือกความเหมาะสมของเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ .....	34
3.2.3.1 Fractional bias (FB).....	34
3.2.3.2 Geometric mean bias (MG).....	34
3.2.3.3 Normalized Mean Square Error (NMSE).....	35
3.2.3.4 Geometric variance (VG).....	35
3.2.3.5 Correlation coefficient (R).....	35
3.2.3.6 Fraction of predictions within a factor of two of observations (FAC2).....	35
3.2.4 คำนวณค่าการสีกร่อนของวัสดุโบราณสถานด้วยฟังก์ชันการสีกร่อนของวัสดุ .....	36
3.2.5 ประเมินค่าเชิงพื้นที่ของการสีกร่อนของวัสดุโบราณสถานด้วยเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสม.....	36

3.2.6 ประเมินความเสี่ยงของอัตราการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถาน .....	37
3.2.7 คาดการณ์การอัตราการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานในอนาคต (ปี พ.ศ. 2571) .....	37
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล .....	38
4.1 ความเหมาะสมของเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ .....	38
4.2 ผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศเชิงพื้นที่ .....	39
4.3 ผลการประมาณค่าระดับการสึกกร่อนเชิงพื้นที่ และประเมินความเสี่ยงต่ออัตราการสึกกร่อน .....	41
4.4 สถานการณ์ในอนาคต .....	45
4.5 การสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน .....	47
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	52
5.1 สรุป .....	52
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป .....	53
รายการอ้างอิง .....	54
ประวัติผู้เขียน .....	59



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 วัสดุที่มีการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการสึกกร่อนโบราณสถานกรณีที่ใช้ลเฟอร์ไดออกไซด์มีอิทธิพลหลักในคู่มือการทำแผนที่ UNECE .....	9
ตารางที่ 2 วัสดุที่มีการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการสึกกร่อนโบราณสถานกรณีที่มีสารมลพิษหลายชนิดในคู่มือการทำแผนที่ UNECE .....	10
ตารางที่ 3 ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารมลพิษทางอากาศ และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา กรณีที่ใช้ลเฟอร์ไดออกไซด์มีอิทธิพลหลัก.....	10
ตารางที่ 4 ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารมลพิษทางอากาศ และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา กรณีที่มีสารมลพิษหลายชนิด .....	12
ตารางที่ 5 ค่าที่ยอมรับได้สำหรับการสึกกร่อน และช่วงการบำรุงรักษาโบราณสถาน .....	14
ตารางที่ 6 อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ที่ $n$ เท่ากับ 1.0 (อัตราการสึกกร่อนพื้นฐาน) 1.5 2.0 และ 2.5 (หน่วย ไมโครเมตร) .....	15
ตารางที่ 7 ขอบล่าง (Lower quartiles) และขอบบน (Upper quartiles) ของค่าที่ได้จากการทดสอบและค่าที่ทำนายที่ใช้ข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม และฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุจากโปรแกรมการรับสัมผัสอื่น ๆ .....	22
ตารางที่ 8 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการสึกกร่อนที่วัดได้ในพื้นที่ประวัติศาสตร์ของอิสตันบูล (ไมโครเมตรต่อปี) .....	25
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์พิจารณาคัดเลือกเทคนิคโดยตัวชี้วัดทางสถิติ.....	39
ตารางที่ 10 ผลการประมาณค่าระดับการสึกกร่อนพื้นที่กรุงเทพมหานคร .....	42
ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความเสี่ยงการสึกกร่อนของโบราณสถานในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน..	48

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา - กรุงเทพมหานครและจังหวัดโดยรอบ .....	3
ภาพที่ 2 ชั้นวางเพื่อรองรับตัวอย่างวัสดุและอุปกรณ์ตัวอย่างแบบพลาสซีฟ .....	21
ภาพที่ 3 แผนที่ความเสี่ยงการกัดกร่อนบริเวณคาบสมุทรมาเลเซีย .....	23
ภาพที่ 4 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์	25
ภาพที่ 5 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน	26
ภาพที่ 6 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุทองแดง .....	26
ภาพที่ 7 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุสัมฤทธิ์หล่อ .....	27
ภาพที่ 8 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุสัมฤทธิ์หล่อปี ค.ศ. 1995 (บนซ้าย) และ 2010 (บนขวา) และแผนที่ n-factor สำหรับวัสดุสัมฤทธิ์หล่อในปี ค.ศ. 1995 (ซ้ายล่าง) และ 2010 (ขวาล่าง).....	28
ภาพที่ 9 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์ ปี ค.ศ. 1995 (บนซ้าย) และ 2010 (บนขวา) และแผนที่ n-factor สำหรับวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์ ในปี ค.ศ. 1995 (ซ้ายล่าง) และ 2010 (ขวาล่าง).....	28
ภาพที่ 10 ข้อมูลนำเข้าและผลลัพธ์ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น .....	29
ภาพที่ 11 แผนผังวิธีการดำเนินงาน .....	32
ภาพที่ 12 แผนที่ความเข้มข้นของซิลเฟอร์ไดออกไซด์ในปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)	40
ภาพที่ 13 แผนที่ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ในปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)	40
ภาพที่ 14 แผนที่ความเข้มข้นของโอโซนในปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา) .....	41
ภาพที่ 15 แผนที่ความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนในปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา).....	41
ภาพที่ 16 แผนที่การสึกกร่อนของวัสดุทองแดง ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา).....	43
ภาพที่ 17 แผนที่การสึกกร่อนของวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์ ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา) .....	44

ภาพที่ 18 แผนที่มีการสักกร่อนของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)  
 ..... 44

ภาพที่ 19 แผนที่มีการสักกร่อนของวัสดุสังกะสี ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา) ..... 44

ภาพที่ 20 แผนที่มีการสักกร่อนของวัสดุสัมฤทธิ์หล่อ ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา) .... 45

ภาพที่ 21 แผนที่มีการสักกร่อนของวัสดุทองแดง ปี พ.ศ. 2571 ..... 46

ภาพที่ 22 แผนที่มีการสักกร่อนของหินปูนพอร์ตแลนด์ ปี พ.ศ. 2571..... 46

ภาพที่ 23 แผนที่มีการสักกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน ปี พ.ศ. 2571..... 46

ภาพที่ 24 แผนที่มีการสักกร่อนของสังกะสี ปี พ.ศ. 2571 ..... 47

ภาพที่ 25 แผนที่มีการสักกร่อนของสัมฤทธิ์หล่อปี พ.ศ. 2571..... 47



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มา และความสำคัญ

การสึกกร่อนของโบราณสถานถือเป็นผลกระทบอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นจากมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ และความทนทานของโครงสร้างวัสดุ ซึ่งไม่ค่อยมีผู้ใดกล่าวถึงหรือได้รับความสนใจ กล่าวถึงการมีแหล่งกำเนิดมลพิษเพิ่มขึ้นทั้งในเขตชุมชนขนาดใหญ่ และพื้นที่กำลังพัฒนาที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วของกิจกรรมอุตสาหกรรม การคมนาคม การจราจร และการก่อสร้าง รวมทั้งพื้นที่ที่เป็นที่ตั้งโรงไฟฟ้า และการเผาในที่โล่ง สารมลพิษทางอากาศที่เป็นปัญหาหลักและเกินมาตรฐานซึ่งจะยังคงเป็นปัญหาในอนาคตที่สำคัญนั้น ได้แก่ ฝุ่นละออง และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยเฉพาะฝุ่นละอองในแหล่งชุมชนที่มีการจราจรคับคั่ง สารมลพิษทางอากาศเหล่านี้จะระบายออกจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในเขตชุมชน ทั้งจากยานพาหนะ การก่อสร้าง อาคารบ้านเรือน การก่อสร้างปรับปรุงถนนและผิวจราจร ตลอดจนโรงงานอุตสาหกรรมและสถานประกอบการต่าง ๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) นอกจากนี้ยังทำให้เกิดฝนกรดเมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำฝน เกิดเป็นกรดซัลฟูริก ทำให้ทรัพย์สินและสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ เกิดความเสียหาย ส่งผลกระทบต่อความเสื่อมโทรมของโบราณสถานในพื้นที่นั้น ๆ เป็นเหตุให้การสึกกร่อนของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน พารามิเตอร์บรรยากาศทั่วไปที่อาจนำไปสู่การสึกกร่อนของโบราณสถานประกอบด้วย (1) ปัจจัยสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน รังสีดวงอาทิตย์ ความเร็วลม ฯลฯ และ (2) มลพิษทางอากาศ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) และคลอไรด์ (Cl) พบว่ามีส่วนร่วมของการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศและยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุของโบราณสถานอีกด้วย (Syed, 2006)

ผลกระทบของมลพิษทางอากาศต่อวัสดุที่สัมผัสกับบรรยากาศได้มีการศึกษามาอย่างต่อเนื่องตัวอย่างเช่น โครงการ International Co-operative Programme on Effects on Materials including Historic and Cultural Monuments (ICP Materials) ซึ่งอยู่ภายใต้คณะกรรมการเศรษฐกิจแห่งสหประชาชาติสำหรับยุโรป (United Nations Economic Commission for Europe: UN ECE) (Reiss, Rihm, Thöni, & Faller, 2004; Tidblad et al.,



2001) ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างการสีกกร่อนของวัสดุต่าง ๆ ร่วมกับการตรวจวัดสารมลพิษในบรรยากาศและพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยา และนำมาพัฒนาเป็นฟังก์ชันการสีกกร่อนของวัสดุ Dose response functions (DRFs) สามารถนำมาประเมินหรือทำนายการเสื่อมสภาพของวัสดุของโบราณสถานภายใต้สภาพแวดล้อม และสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกันในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ได้ โดยการนำข้อมูลการตรวจวัดสารมลพิษในบรรยากาศและพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาของพื้นที่ และช่วงเวลาต้องการศึกษาคำนวณในสมการของฟังก์ชันการสีกกร่อนของวัสดุที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ดังนั้นการประเมินการสีกกร่อนของโบราณสถานจึงมีความสำคัญเพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการป้องกันมลพิษและวางแผนอนุรักษ์โบราณสถาน

ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหามลพิษทางอากาศที่ส่งผลต่อการสีกกร่อนโบราณสถานที่สำคัญในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาอัตราการความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศ และนำฟังก์ชันการสีกกร่อนของวัสดุมาใช้ในการประเมินระดับผลกระทบการสีกกร่อนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร เพื่อให้ทราบถึงระดับของผลกระทบการสีกกร่อนโบราณสถาน และความเสี่ยงอัตราการสีกกร่อนโบราณสถานในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาแนวทางการแก้ไขปัญหาให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

1. เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของสารมลพิษ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) โอโซน (O<sub>3</sub>) และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM<sub>10</sub>) ในบรรยากาศเชิงพื้นที่ด้วยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์
2. เพื่อประมาณค่าระดับผลกระทบการสีกกร่อนเชิงพื้นที่ด้วยฟังก์ชันการสีกกร่อนของวัสดุ
3. เพื่อประเมินความเสี่ยงต่ออัตราการสีกกร่อนโบราณสถานในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน กรุงเทพมหานคร

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. พื้นที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานคร และพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน ตั้งอยู่ในที่แขวงพระบรมมหาราชวัง แขวงชนะสงคราม แขวงบวรนิเวศ แขวงสำราญราษฎร์ แขวงศาลเจ้าพ่อเสือ แขวงเสาชิงช้า แขวงวัดราชบพิธ แขวงตลาดยอด และแขวงบูรพาภิรมย์ เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร

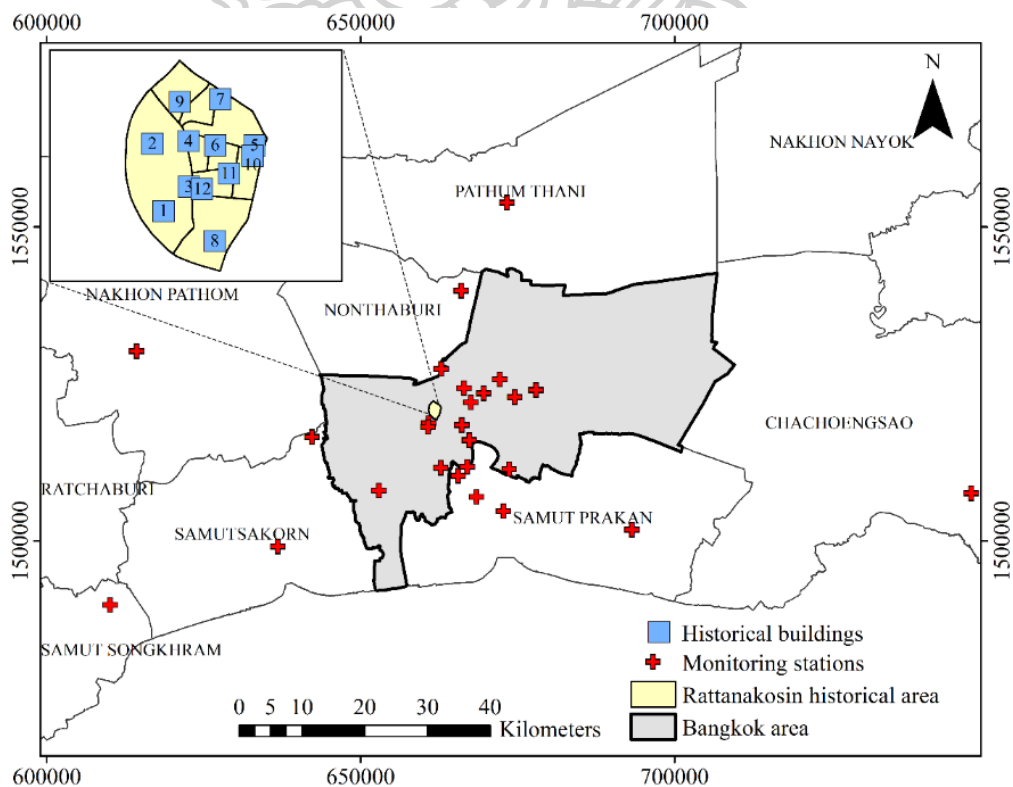
2. ตามประกาศพระราชบัญญัติโบราณสถาน โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ และพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535 (สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา, 2535) ผู้วิจัยได้เลือกโบราณสถานประเภทศาสนสถานจำนวน 12 แห่ง ที่ขึ้นทะเบียน และประกาศในราชกิจจานุเบกษา ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2492-2552 ได้แก่ วัดพระเชตุพนวิมลมังคลาราม วัดมหาธาตุยุวราชรังสฤษฎิ์ราชวรมหาวิหาร วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม วัดบูรณศิริมาตยาราม วัดราชนันทาราม วัดมหรณพาราม วัดบวรนิเวศวิหาร วัดราชบูรณราชวรวิหาร วัดชนะสงคราม วัดเทพธิดาราม วัดสุทัศน์เทพวราราม วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม (ภาพที่ 1 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา)

3. ข้อมูลคุณภาพอากาศ และข้อมูลอุณหภูมิจะรวบรวมจากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ใกล้เคียง

4. ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุได้มาจากโครงการ MULTI-ASSESS ของสหภาพยุโรป

5. แผนที่ข้อมูลพื้นที่แขวงในกรุงเทพมหานครจากศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

6. การสึกกร่อนคำนวณช่วงเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 ถึง ปี พ.ศ. 2562



ภาพที่ 1 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา - กรุงเทพมหานครและจังหวัดโดยรอบ



หมายเหตุ : ตัวเลขในขอบเขตของพื้นที่ศึกษา บ่งชี้ถึงโบราณสถานประเภทศาสนสถานจำนวน 12 แห่ง คือ  
1 วัดพระเชตุพนวิมลมังคลาราม 2 วัดมหาธาตุยุวราชรังสฤษฎิ์ราชวรมหาวิหาร 3 วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม  
4 วัดบูรณศิริมาตยาราม 5 วัดราชนันทาราม 6 วัดมหรณพาราม 7 วัดบวรนิเวศวิหาร 8 วัดราชบูรณราชวรวิหาร  
9 วัดชนะสงคราม 10 วัดเทพธิดาราม 11 วัดสุทัศน์เทพวราราม และ 12 วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาความสึกกร่อนของโบราณสถานที่เกิดจากสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ทำการใช้ซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ArcMap เวอร์ชัน 10.1 ในการศึกษาและแสดงผลข้อมูลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารมลพิษ การประมาณค่าระดับผลกระทบการสึกกร่อน ลักษณะการกระจายเชิงพื้นที่ของสารมลพิษ และประเมินความเสี่ยงอัตราการสึกกร่อนโบราณสถาน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง เกาะกรุงรัตนโกสินทร์ โบราณสถาน การสึกกร่อนโบราณสถาน ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ เกณฑ์การวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic information system: GIS) การประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Spatial interpolation) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 เกาะกรุงรัตนโกสินทร์

เกาะกรุงรัตนโกสินทร์ตั้งอยู่บนแผ่นดินที่มีน้ำล้อมรอบในลักษณะเกาะ มีขอบเขตอยู่ภายในพื้นที่ระหว่างแม่น้ำเจ้าพระยาทางตะวันตกกับคลองหลอดหรือคลองคูเมืองทางตะวันออก เกาะรัตนโกสินทร์แบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ เกาะรัตนโกสินทร์ชั้นในและเกาะรัตนโกสินทร์ชั้นนอก โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย วัด วัง โบราณสถาน บ้านเรือน และตึกแถว ที่มีประวัติความเป็นมาและมีความสำคัญต่อกรุงเทพมหานคร พื้นที่ของเกาะรัตนโกสินทร์ชั้นใน คือ พื้นที่ริมแม่น้ำเจ้าพระยามาถึงคลองคูเมืองเดิมหรือที่เรียกว่า คลองหลอด รัตนโกสินทร์ชั้นในนี้เป็นเขตที่มีอาคารสถานที่ซึ่งมีความสำคัญมาตั้งอยู่ เช่น พระบรมมหาราชวัง วัดที่มีชื่อเสียงและมีความสำคัญ สถานที่ราชการ สถานศึกษารุ่นเก่า ซึ่งเป็นอาคารสถานที่ที่มีความสำคัญประวัติศาสตร์และมีรูปแบบสถาปัตยกรรมที่น่าสนใจ นอกจากนี้ยังมีพื้นที่สาธารณะ และอนุสรณ์สถานต่าง ๆ หลายแห่ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตั้งถิ่นฐานของชุมชนในสมัยกรุงรัตนโกสินทร์ช่วงแรก ในส่วนพื้นที่เกาะรัตนโกสินทร์ชั้นนอกเป็นบริเวณที่นับจากคลองคูเมืองเดิมถึงบริเวณแนวคลองผดุงกรุงเกษมเป็นแหล่งที่มีวัดและสถานที่สำคัญอยู่มากมายหลายแห่งเช่นกัน ในเขตกรุงรัตนโกสินทร์ชั้นนอกจะเน้นไปในด้านขององค์ประกอบเมือง

ประเภทสาธารณูปโภคและสาธารณูปการ เช่น ถนนสถานที่ทำงานเพื่องานบริการของรัฐ (พิเชษฐ์ เดชผิว, 2548)

## 2.2 โบราณสถาน

พระราชบัญญัติโบราณสถาน โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535 ได้ระบุว่า โบราณสถาน หมายถึง อสังหาริมทรัพย์ซึ่งโดยอายุ หรือโดยลักษณะแห่งการก่อสร้าง หรือโดยหลักฐานเกี่ยวกับประวัติของอสังหาริมทรัพย์นั้นเป็นประโยชน์ในทางศิลป ประวัติศาสตร์ หรือโบราณคดี ทั้งนี้ ให้รวมถึงสถานที่ที่เป็นแหล่งโบราณคดี แหล่งประวัติศาสตร์ และอุทยานประวัติศาสตร์ด้วย (สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา, 2535) โบราณสถานนับเป็นมรดกทางวัฒนธรรม (Cultural Heritage) ที่แสดงเอกลักษณ์ของแต่ละประเทศ เป็นที่ดึงดูดคนให้เข้าไปเยี่ยมชมสามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจทำรายได้ให้แก่ท้องถิ่นที่มีมรดกวัฒนธรรม และประเทศชาติ ทั้งนี้ เพราะเหตุว่า ความก้าวหน้าในเรื่องของระบบการคมนาคม และการสื่อสารทำให้ประชาชนในแต่ละภูมิภาคของโลกสามารถติดต่อสื่อสารกันได้อย่างสะดวกขึ้น เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้แบบบรรณนิมการ อุปกค บริโภค แต่มีสิ่งหนึ่งที่ไม่เหมือนกันก็คือ มรดกวัฒนธรรม ในหลายประเทศต่างเริ่มหันมาฟื้นฟูมรดกวัฒนธรรมให้คงอยู่เป็นหลักฐานทางประวัติศาสตร์ของประเทศ เป็นเกียรติ และความภาคภูมิใจหนึ่งเพื่อประโยชน์ทางเศรษฐกิจ (พิสิฐ เจริญวงศ์, 2535)

## 2.3 การสึกกร่อนของโบราณสถาน

เนื่องจากโบราณสถานส่วนใหญ่มักตั้งอยู่ในพื้นที่กลางแจ้ง เป็นเหตุให้เกิดความเสื่อมโทรมจากการได้รับความเสี่ยงต่อสภาพแวดล้อม มลภาวะทางอากาศที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ในหัวข้อต่อไปนี้จะเป็นการกล่าวถึงสาเหตุ และผลกระทบของการสึกกร่อนโบราณสถาน

สารมลพิษทางอากาศทำให้วัสดุต่าง ๆ เสียหายได้ เกิดความสกปรก การสึกกร่อน หรือเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ ควัน ฝุ่นละออง และอนุภาคที่เป็นกรดหรือด่างทำให้ข้าวของชำรุดเสียหาย เช่น สะพานเหล็ก สีทาบ้าน ยางรถยนต์ อนุภาคฝุ่นละอองแขวนลอยในบรรยากาศที่ตกกลับตามแรงดึงดูดของโลกแล้วเกาะติดวัตถุ และสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ทำให้เกิดความสกปรกเลอะเทอะ (วนิดา จินศาสตร์, 2551) นอกจากนี้อนุภาคฝุ่นละอองแขวนลอยยังมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ไว้ที่พื้นผิวอนุภาค หรือชนิดของอนุภาคฝุ่นละอองที่เป็นชนิดที่มีสภาพเป็นกรดหรือองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นอันตราย เมื่อเกาะติดวัตถุหรือสิ่งก่อสร้างสามารถทำอันตรายต่อสิ่งต่าง ๆ เช่น ทำให้เกิดการสึกกร่อนของวัสดุที่ทำจากโลหะ ทำลายผิวหน้าของสิ่งก่อสร้างทำให้เกิดความ

เสียหายต่อผลงานทางศิลปะ (วนิดา จินตศาสตร์, 2551) ปัญหามลพิษที่อยู่ในบรรยากาศทั่วไปมาจากหลายสาเหตุ และสะสมเป็นเวลานาน เช่น ฝนจากการตกสะสมของกรด และการเปลี่ยนสภาพภูมิอากาศ สารมลพิษที่เป็นตัวการทำให้เกิดสารกรดในบรรยากาศ (Acid precursors) ที่สำคัญ ๆ มีอยู่ 2 ชนิด ชนิดแรก คือ ออกไซด์ของซัลเฟอร์ ( $\text{SO}_x$ ) ซึ่งรวมถึงก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) และชนิดที่สอง คือ ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) ซึ่งรวมถึงก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) แหล่งที่มาของสารมลพิษเหล่านี้ มีทั้งที่เป็นแหล่งมนุษย์สร้าง (Man-made sources) ได้แก่ การเผาถ่านหินและน้ำมันเตาในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม การเผาขยะ และการเผาไหม้น้ำมันเบนซินน้ำมันดีเซล ในยานพาหนะประเภทต่าง ๆ เช่น รถยนต์ รถบรรทุก รถโดยสารประจำทาง รถไฟ และเรือ และอีกหนึ่งแหล่งที่มาของสารมลพิษเหล่านี้ คือ เกิดขึ้นจากแหล่งธรรมชาติ (Natural sources) ได้แก่ การคุ และ การระเบิดของภูเขาไฟ ไฟไหม้ป่าตามธรรมชาติ ทะเล และมหาสมุทร การเน่าเปื่อย และการย่อยสลายของซากพืช สัตว์ และสารอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ แหล่งธรรมชาติมีบทบาทความสำคัญต่อการตกสะสมของกรด น้อยกว่าแหล่งมนุษย์สร้าง (กรมควบคุมมลพิษ, 2562)

สารประกอบซัลเฟอร์สามารถกัดกร่อนวัสดุ และสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ได้ เป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะ การลดความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศจาก 0.15 ส่วนในล้านส่วน ไปที่ 0.05 ส่วนในล้านส่วน จะสามารถลดอัตราการกัดกร่อนของสังกะสีลงได้ 4 เท่า ส่วนอะลูมิเนียมค่อนข้างจะคงทนต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อย่างไรก็ตาม ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าร้อยละ 70 อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มสูงขึ้น ละอองกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ยังสามารถกัดกร่อนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น หินปูน หินอ่อน หินชนวน กระเบื้องหลังคา และปูนซีเมนต์ โดยเมื่อทำปฏิกิริยาจะเกิดเป็นสารละลายแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) เกิดการสึกกร่อนขึ้น และเมื่อถูกฝนชะล้างออกไป พื้นผิวหน้าวัสดุเปิด การกัดกร่อนจะกินลึกลงไปเรื่อย นอกจากนี้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และกรดซัลฟิวริก จะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยจำพวกไนลอนลดลง (กรมควบคุมมลพิษ, 2562)

สารประกอบไนโตรเจนไม่มีผลโดยตรงต่อวัตถุแต่เมื่อก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอนโดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดเป็นก๊าซโอโซน ( $\text{O}_3$ ) ซึ่งมีผลกระทบต่อวัสดุทำให้วัสดุเกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น (ศิวพันธุ์ ชูอินทร์, 2556)

ผลกระทบของมลพิษทางอากาศที่มีต่อสิ่งก่อสร้าง หรือวัตถุที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ และวัฒนธรรมเป็นเรื่องที่อยู่ในความสนใจ และเป็นปัญหาในหลาย ๆ ประเทศ โดยอาจก่อให้เกิด

ผลกระทบต่อวัสดุที่มีคุณค่าทางวัฒนธรรม ศิลปะ และศาสนา ทำให้อาคารผุกร่อนได้ เมื่อผลกระทบของการสึกกร่อนเกิดขึ้นแล้วยากที่จะสามารถคืนสภาพได้ดังเดิม (วนิดา จินศาสตร์, 2551)

## 2.4 ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ

ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุเป็นฟังก์ชันที่ให้ความสำคัญกับปริมาณความเข้มข้นหรือการสะสมของสารมลพิษทางอากาศ อัตราการสึกกร่อนของวัสดุ โดยฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุมีความสำคัญในการพัฒนาระบบสำหรับการจำแนกประเภทของการสึกกร่อนของสภาพแวดล้อม การจัดทำแผนที่ของพื้นที่ที่มีความเสี่ยงเพิ่มขึ้นของการสึกกร่อนและการคำนวณค่าความเสียหายที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของวัสดุ ซึ่งกลุ่มประเทศยุโรปมีการสร้างฟังก์ชันนี้ภายใต้โครงการ ICP Materials และโครงการ MULTI-ASSESS ของคณะกรรมการวิชาการเศรษฐกิจแห่งสหประชาชาติสำหรับยุโรป (Reiss et al., 2004; Tidblad et al., 2001) โดยทำการเก็บตัวอย่างการสึกกร่อนของวัสดุต่าง ๆ ร่วมกับการตรวจวัดสารมลพิษในบรรยากาศและพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาในเขตพื้นที่ยุโรปและอเมริกาเหนือ เพื่อนำมาพัฒนาเป็นฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุและพัฒนาระบบสำหรับจัดจำแนกประเภทของการสึกกร่อนจากสภาวะอากาศ โดยโปรแกรมการรับสมัครครั้งแรกรวมถึงการประเมินตัวอย่างหลังจาก 1 ปี 2 ปี 4 ปี และ 8 ปี (ช่วงปี ค.ศ. 1987-1995) ทำการวิเคราะห์ทางสถิติได้ให้ความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อปริมาณสารมลพิษทางอากาศสำหรับวัสดุหลายชนิดที่เชื่อมโยงกับการเสื่อมสภาพด้วยพารามิเตอร์ด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นฟังก์ชันสำหรับสถานการณ์ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีอิทธิพลหลัก อนึ่งจากการที่มีปริมาณการปลดปล่อยซัลเฟอร์สู่บรรยากาศลดลง ทำให้การสึกกร่อนของวัสดุไม่ได้เกิดจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นในปี ค.ศ. 1997-2001 จึงมีการเพิ่มเติมตัวอย่างวัสดุจากเดิมที่ได้มีการดำเนินการมาก่อนหน้านี้ เช่น สังกะสี สัมฤทธิ์หล่อ และหินปูนพอร์ตแลนด์ พร้อมกับวัสดุที่ใช้ทดสอบใหม่ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน เพื่อพัฒนาขึ้นฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุชุดใหม่ขึ้นเป็นฟังก์ชันสำหรับสถานการณ์สารมลพิษหลายชนิด ในการอธิบายการเสื่อมสภาพของวัสดุสำหรับสถานการณ์สารมลพิษหลายชนิด และได้จัดทำคู่มือเกี่ยวกับเลือกใช้เกณฑ์และระเบียบวิธีการของฟังก์ชันไว้ใน UNECE Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels; and Air Pollution Effects, Risks and Trends (Spranger, Gregor, & Lorenz, 2004) โดยวัสดุที่มีการวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อนโบราณสถานที่กำหนดไว้แสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 (Tidblad et al., 2012) และพัฒนาฟังก์ชันการ

สีกร่อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 (European Union, 2005; Tidblad et al., 2012) ปัจจุบันมีการนำฟังก์ชันการสีกร่อนของวัสดุไปใช้ในการประเมินผลกระทบและอนุรักษ์โบราณสถาน เช่น การนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมคำนวณการประมาณค่าการสีกร่อนของโบราณสถานจากภาวะมลพิษในบรรยากาศ (Onchang & Hawker, 2019) การนำไปจัดทำแผนที่แสดงการสีกร่อนและประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่ (de la Fuentea, Vegaa, Viejob, Díaz, & Morcillo, 2013) เป็นต้น

**ตารางที่ 1** วัสดุที่มีการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการสีกร่อนโบราณสถานกรณีที่ใช้ลเฟอร์ไดออกไซด์มีอิทธิพลหลักในคู่มือการทำแผนที่ UNECE

วัสดุ	T	Rh	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	Prec	pH	Cl <sup>-</sup>
เหล็กสนิม (Weathering steel)	x	x	x						
สังกะสี (Zinc)	x	x	x				x	x	
อลูมิเนียม (Aluminium)	x	x	x				x		x
ทองแดง (Copper)	x	x	x	x			x	x	
สัมฤทธิ์หล่อ (Bronze)	x	x	x				x	x	x
หินปูน (Limestone)	x		x				x	x	
หินทราย (Sandstone)	x		x				x	x	
เหล็กแผ่นรีดเย็นเคลือบ แอลคีนเมลามีน (Coil- coated steel with alkyd melamine)	x	x	x				x		
แผ่นเหล็กสำเร็จรูป เคลือบแอลคีน (Steel panel with alkyd)	x	x	x				x		

ที่มา: Tidblad et al. (2012)



**ตารางที่ 2** วัสดุที่มีการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการสึกกร่อนโบราณสถานกรณีที่มีสารมลพิษหลายชนิดในคู่มือการทำแผนที่ UNECE

วัสดุ	T	Rh	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	Prec	pH	Cl <sup>-</sup>
เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)	x	x	x			x	x	x	
สังกะสี	x	x	x		x				
สัมฤทธิ์หล่อ	x	x	x			x	x	x	
หินปูน		x	x		x	x	x	x	

ที่มา: Tidblad et al. (2012)

**ตารางที่ 3** ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารมลพิษทางอากาศ และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา กรณีที่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีอิทธิพลหลัก

วัสดุ	ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ	ฟังก์ชันอุณหภูมิ
เหล็กสนิม	$ML = 34[SO_2]^{0.33} \exp(0.020Rh + f_{ws}(T))t^{0.33}$	$f_{ws}(T) = 0.059(T-10)$ (เมื่อ $T \leq 10^\circ C$ ) และ $f_{ws}(T) = -0.036(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
สังกะสี	$ML = 1.4[SO_2]^{0.22} \exp(0.018Rh + f_{zn}(T)) + 0.029Rain[H^+]t$	$f_{zn}(T) = 0.062(T-10)$ (เมื่อ $T \leq 10^\circ C$ ) และ ที่ $f_{zn}(T) = -0.021(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
อลูมิเนียม	$ML = 0.0021[SO_2]^{0.23} Rh \cdot \exp(f_{Al}(T))t^{1.2} + 0.000023Rain[Cl^-]t$	$f_{Al}(T) = 0.031(T-10)$ (เมื่อ $T \leq 10^\circ C$ ) และ $f_{Al}(T) = -0.061(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )

ที่มา: European Union (2005); Kucera (2014); Tidblad et al. (2001)

ตารางที่ 3 ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารมลพิษทางอากาศ และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา กรณีที่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีอิทธิพลหลัก (ต่อ)

วัสดุ	ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ	ฟังก์ชันอุณหภูมิ
ทองแดง	$ML = 0.0027[SO_2]^{0.32}[O_3]^{0.79}Rh \cdot \exp(f_{Cu}(T))t^{0.78} + 0.050Rain[H^+]t^{0.89}$	$f_{Cu}(T) = 0.083(T-10)$ (เมื่อ $T \leq 10^\circ C$ ) และ $f_{Cu}(T) = -0.032(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
สัมฤทธิ์หล่อ	$ML = 0.026[SO_2]^{0.44}RH \cdot \exp(f_{Br}(T))t^{0.86} + 0.029Rain[H^+]t^{0.76} + 0.00043Rain[Cl]t^{0.76}$	$f_{Br}(T) = 0.060(T-11)$ (เมื่อ $T \leq 10^\circ C$ ) และ $f_{Br}(T) = -0.067(T-11)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
หินปูนพอร์ตแลนด์	$R = 2.7[SO_2]^{0.48} \exp(f_{Pl}(T))t^{0.96} + 0.019Rain[H^+]t^{0.96}$	$f_{Pl}(T) = -0.018T$
หินทราย	$R = 2.0[SO_2]^{0.52} \exp(f_{Ms}(T))t^{0.91} + 0.028Rain[H^+]t^{0.91}$	$f_{Ms}(T) = 0$ (เมื่อ $T \leq 10^\circ C$ ) และ $f_{Ms}(T) = -0.013(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
เหล็กแผ่นรีดเย็น	$L = [5/(0.0084[SO_2] + 0.015Rh + f_{Cc}(T))t^{0.43} + 0.00082Rain]^{1/0.43}$	$f_{Cc}(T) = 0.040(T-10)$ (เมื่อ $T \leq 10^\circ C$ ) และ $f_{Cc}(T) = -0.064(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
เคลือบแอลคีน เมลามีน		
แผ่นเหล็กสำเร็จรูป	$L = [5/(0.033[SO_2] + 0.013Rh + f_{Sp}(T))t^{0.41} + 0.0013Rain]^{1/0.41}$	$f_{Sp}(T) = 0.015(T-11)$ (เมื่อ $T \leq 11^\circ C$ ) และ $f_{Sp}(T) = -0.15(T-11)$ (เมื่อ $T > 11^\circ C$ )
เคลือบแอลคีน		
กระจก	$LL = 0.013[SO_2]^{0.49}Rh^{2.8}t$	

ที่มา: European Union (2005); Kucera (2014); Tidblad et al. (2001)



ตารางที่ 4 ฟังก์ชันการสีกกร่อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารมลพิษทางอากาศ และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา กรณีที่มีสารมลพิษหลายชนิด

วัสดุ	ฟังก์ชันการสีกกร่อนของวัสดุ	ฟังก์ชันอุณหภูมิ
เหล็กกล้า	$ML = 29.1 + (21.7 + 1.39[SO_2]^{0.6}Rh_{60}e^{f(T)} + 1.29Rain[H^+] +$	$f(T) = 0.15(T-10)$
คาร์บอน	$0.593PM_{10})t^{0.6}$ $R = 6.5 + 0.178[SO_2]^{0.6}Rh_{60}e^{f(T)} + 1.29Rain[H^+] + 0.076PM_{10}$	เมื่อ $(T < 10^\circ C)$ และ $f(T) = -0.054(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
สังกะสี	$ML = 1.82 + (1.71 + 0.471[SO_2]^{0.22}e^{0.018Rh+f(T)} +$ $0.041Rain[H^+] + 1.37[HNO_3])t$ $R = 0.49 + 0.066[SO_2]^{0.22}e^{0.018Rh+f(T)} + 0.057Rain[H^+] +$ $0.192[HNO_3]$	$f(T) = 0.062(T-10)$ เมื่อ $(T < 10^\circ C)$ และ $f(T) = -0.021(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
ทองแดง	$ML = 3.12 + (1.09 + 0.00201[SO_2]^{0.4}[O_3]Rh_{60}e^{f(T)} +$ $0.0878Rain[H^+])t$	$f(T) = 0.083(T-10)$ เมื่อ $(T < 10^\circ C)$ และ $f(T) = -0.032(T-10)$ (เมื่อ $T > 10^\circ C$ )
สัมฤทธิ์หล่อ	$ML = 1.33 + (0.00876[SO_2]Rh_{60}e^{f(T)} + 0.0409Rain[H^+] +$ $0.0380PM_{10})t$ $R = 0.15 + 0.000985[SO_2]Rh_{60}e^{f(T)} + 0.00465Rain[H^+] +$ $0.00432PM_{10}$	$f(T) = 0.060(T-11)$ (เมื่อ $T < 11^\circ C$ ) และ $f(T) = -0.067(T-11)$ (เมื่อ $T > 11^\circ C$ )
หินปูน	$R = 4.0 + 0.0059[SO_2]Rh_{60} + 0.054Rain[H^+] +$	
พอร์ตแลนด์	$0.078[HNO_3]Rh_{60} + 0.0258PM_{10})t$	
หินอ่อน	$R = (0.00233 (Rh) (0.38[SO_2])) t + 0.00309Rain$	
ไม้	$ML = -42.9(12t) - 2.3(T) - 0.035(Rh) + 0.14 (T)(12t) +$ $0.024(T)(Rh) + 0.45(Rh)(12t)$	

ที่มา: European Union (2005); Kucera (2014); Lan et al. (2005); Viitanen et al. (2010)

$$\text{เมื่อ } HNO_3 = 516 e^{-3400/(T+273)} \times ([NO_2][O_3]Rh)^{0.5}$$

สมการที่ 1

โดยที่ ML	คือ การสูญเสียวัสดุ (Material loss) (กรัมต่อตารางเมตร)
R	คือ ระดับความลึกของผิววัสดุที่เกิดการสึกกร่อน (ไมโครเมตร)
L	คือ ช่วงเวลาการบำรุงรักษา (อายุการใช้งาน) (ปี)
LL	คือ ระดับความลึกของผิววัสดุที่เกิดการสึกกร่อน (นาโนเมตร)
Rh	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)
[SO <sub>2</sub> ] [NO <sub>2</sub> ] [O <sub>3</sub> ] [HNO <sub>3</sub> ] [PM <sub>10</sub> ]	คือ ความเข้มข้นสารมลพิษในบรรยากาศ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
[Cl <sup>-</sup> ]	คือ ความเข้มข้นคลอไรด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Rh <sub>60</sub>	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ) (กรณีที่ Rh>60 ให้มีค่าเท่ากับ (Rh-60) กรณีที่ Rh≤ 60 ให้มีค่าเท่ากับ 0)
Rain	คือ ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร)
[H <sup>+</sup> ]	คือ ความเข้มข้นไฮโดรเจนไอออนในน้ำฝน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
T	คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
t	คือ เวลาที่รับสัมผัส (ปี)

## 2.5 เกณฑ์การวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้

การวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ (Tolerable corrosion rate) ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการบูรณะโบราณสถาน โดยสามารถพิจารณาได้จาก 2 ปัจจัย คือ 1) การสึกกร่อนที่ยอมรับได้ก่อนดำเนินการ ขึ้นอยู่กับระยะของการเสื่อมสภาพเมื่อต้องเริ่มต้นทำการซ่อมแซมพื้นฟูโบราณสถาน และ 2) ระยะเวลาที่ยอมรับได้ระหว่างการซ่อมบำรุงรักษาตามความถี่ที่ยอมรับได้ใน การซ่อมแซมวัสดุให้คืนสู่สภาพเดิม โดยค่าที่ยอมรับได้สำหรับการสึกกร่อน และช่วงการบำรุงรักษาโบราณสถานแสดงในตารางที่ 5 (European Union, 2005) และ ICP Materials ได้คำนวณระดับอ้างอิงซึ่งแสดงถึงอัตราการสึกกร่อนของพื้นฐาน (K<sub>p</sub>) น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการสึกกร่อนที่ตรวจวัดจากโปรแกรมการรับสัมผัสของวัสดุ (The materials exposure programme) ซึ่งเริ่มต้นในปี พ.ศ. 2530 และสิ้นสุดในปี พ.ศ. 2538 อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้นั้นสามารถแสดงเป็นคุณสมบัติของปัจจัยที่ได้รับการพิจารณาทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ (n) กับอัตราการสึกกร่อนพื้นฐาน (ตารางที่ 6) (Kucera, 2014) โดยอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับ (K<sub>tol</sub>) ได้สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K_{\text{tol}} = n \cdot K_b$$

สมการที่ 2

โดยที่  $n$  คือ ปัจจัยที่ได้รับการพิจารณาทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับช่วงเวลาระหว่างการบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายรายปีที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายของวัสดุก่อสร้าง

$K_b$  คือ อัตราการสึกกร่อนพื้นฐานที่เกิดจากการได้รับสัมผัสมลพิษในช่วงปีแรก

การเลือกค่า  $n$  ที่ใช้ในการวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้มีความสำคัญอย่างหนึ่งเนื่องจากค่า  $n$  เป็นค่าที่ใช้ในการคูณกับการค่าอัตราการสึกกร่อนพื้นฐานที่เกิดจากการได้รับสัมผัสมลพิษในช่วงปีแรก หากเลือกใช้ค่า  $n$  ที่มากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลต่อการคำนวณค่าอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้สูงหรือต่ำกว่าค่าความเป็นจริง อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้สำหรับวัสดุทั่วไปส่วนใหญ่จะใช้  $n$  เท่ากับ 2.5 เนื่องจากสอดคล้องกับเป้าหมายสำหรับการปกป้องวัสดุของโครงสร้างพื้นฐาน และโบราณสถานในปี ค.ศ. 2020 ของโครงการ ICP Materials ซึ่งตัวชี้วัดทั้งหมดจะถูกคำนวณด้วยฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ (United Nations Economic Commission for Europe, 2009) อนึ่งหากเปรียบเทียบระหว่างตารางที่ 5 และตารางที่ 6 จะพบว่าค่าการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ในตารางที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกับค่าการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ที่  $n$  เท่ากับ 2.5 ในตารางที่ 6

**ตารางที่ 5** ค่าที่ยอมรับได้สำหรับการสึกกร่อน และช่วงการบำรุงรักษาโบราณสถาน

วัสดุ	ประเภทของพื้นผิว	การสึกกร่อนที่ยอมรับได้ก่อนดำเนินการ ( $\mu\text{m}$ )	ระยะเวลาที่ยอมรับได้ระหว่างการบำรุงรักษา (years)	อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ ( $\mu\text{m year}^{-1}$ )
หินปูน/หินอ่อน (Limestone/marble)	ส่วนตกแต่ง ที่มีความเก่า (Ornament, aged)	100	12	8.3
	ส่วนตกแต่ง ที่มีการสึกกร่อน (Ornament, corroded)	50	6	8.3
หินทรายเนื้อปูน (Sandstone calcareous)	ส่วนตกแต่ง ที่มีความเก่า	100	12	8.3
	ส่วนตกแต่ง ที่มีการสึกกร่อน	50	6	8.3
ทองแดง	ส่วนตกแต่ง ที่มีความเก่า	50	50	1.0
	ส่วนตกแต่ง ที่มีการสึกกร่อน	10	20	0.5

ที่มา: European Union (2005)

ตารางที่ 5 ค่าที่ยอมรับได้สำหรับการสึกกร่อน และช่วงการบำรุงรักษาโบราณสถาน (ต่อ)

วัสดุ	ประเภทของพื้นผิว	การสึกกร่อนที่ยอมรับได้ก่อนดำเนินการ ( $\mu\text{m}$ )	ระยะเวลาที่ยอมรับได้ระหว่างการบำรุงรักษา (years)	อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ ( $\mu\text{m year}^{-1}$ )
สัมฤทธิ์หล่อ	ส่วนตกแต่ง ที่มีความเก่า	50	50	1.0
สังกะสี	ส่วนตกแต่ง ที่มีการสึกกร่อน	10	15	0.7
	มีการสึกกร่อนอยู่เสมอ (Evenly corroded)	80	50	1.6

ที่มา: European Union (2005)

ตารางที่ 6 อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ที่  $n$  เท่ากับ 1.0 (อัตราการสึกกร่อนพื้นฐาน) 1.5 2.0 และ 2.5 (หน่วย ไมโครเมตร)

วัสดุ	$n = 1.0$	$n = 1.5$	$n = 2.0$	$n = 2.5$
หินปูน	3.2	5.0	6.4	8.0
หินทราย	2.8	4.0	5.5	7.0
ทองแดง	0.34	0.5	0.64	0.8
สัมฤทธิ์	0.25	0.4	0.5	0.6
สังกะสี	0.46	0.7	0.9	1.1
เหล็กกล้าคาร์บอน	8.5	12.0	16.0	20.0

ที่มา: European Union (2005); Kucera (2014)

เกณฑ์การวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้เป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยในการบ่งชี้ว่าโบราณสถานได้รับผลกระทบจากการสัมผัสกับมลพิษทางอากาศและเกิดการเสื่อมสภาพของโบราณสถานนั้นเป็นอันตรายต่อโบราณสถานหรือไม่ เพื่อนำไปใช้ในการหาแนวทางรับมือ และแก้ไขปัญหาให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ต่อไป โดยใช้เกณฑ์การวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้เป็นเกณฑ์เทียบกับอัตราการสึกกร่อนของโบราณสถานที่สามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ

## 2.6 ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เป็นระบบสารสนเทศที่นำเข้าข้อมูล จัดเก็บ วิเคราะห์อย่างเป็นระบบ สามารถทำการสืบค้นข้อมูล และปรับปรุงข้อมูล รวมไปถึงการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อช่วยประกอบการตัดสินใจในเรื่องต่าง ๆ ได้ ข้อมูลที่นำมารวบรวม และจัดเก็บในระบบที่สามารถนำไปจัดการ และวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) โดยข้อมูลเชิงพื้นที่ยังมีการเชื่อมโยงเข้ากับข้อมูลคุณลักษณะ (Attribute data) ที่ใช้อธิบายรายละเอียดของปรากฏการณ์ และคุณลักษณะของข้อมูลเชิงพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งจะทำให้การนำข้อมูลไปใช้มีความถูกต้อง และแม่นยำมากยิ่งขึ้น (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศ และภูมิสารสนเทศ, 2552) ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์จึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ สามารถบอกถึงตำแหน่งที่ตั้ง และข้อมูลเชิงคุณลักษณะของภูมิลักษณะเชิงพื้นที่บนพื้นผิวโลกได้ เช่น บริเวณตำแหน่งของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศหรือบริเวณตำแหน่งของขอบเขตโบราณสถาน เป็นต้น และข้อมูลเชิงคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลจำนวนประชากร และจำนวนหลังคาเรือน เป็นต้น โดยในการจัดทำแผนที่แสดงความเสี่ยงด้านมลพิษทางอากาศสามารถใช้เทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Spatial interpolation) ในการคาดการณ์ความเข้มข้นของปริมาณสารมลพิษในบรรยากาศแต่ละชนิดในแต่ละพื้นที่ที่ไม่มีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศได้ เพื่อใช้หาแนวโน้มความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะมลพิษทางอากาศได้

## 2.7 การประมาณค่าเชิงพื้นที่

การประมาณค่าเชิงพื้นที่เป็นการทำนายค่าให้กับเซลล์ในราสเตอร์ (Raster) จากข้อมูลจุดตัวอย่างที่มีอยู่อย่างจำกัด สามารถใช้ในการทำนายค่าที่ไม่ทราบได้จากจุดใด ๆ ทางภูมิศาสตร์ได้ ไม่ว่าจะเป็นจุดความสูง (Elevation) ปริมาณน้ำฝน การกระจายตัวของสารเคมี ระดับเสียงรบกวน และอื่น ๆ (สุเพชกร จิรขจรกุล, 2552) วิธีการประมาณค่าในช่วงมีหลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะทำการสันนิษฐานว่าควรจะประมาณการค่าใดกำหนดให้กับเซลล์ที่ต้องการประมาณข้อมูล ขึ้นอยู่กับการจำลองข้อมูลจริงที่มีอยู่ และการกระจายตัวของจุดตัวอย่าง วิธีการประมาณค่าแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพื้นผิวจริงแต่ละลักษณะ จะเห็นได้ว่าวิธีการประมาณค่าในช่วงที่ใช้จะเปลี่ยนไปตามจุดตัวอย่างเรื่องต่าง ๆ การกระจายตัวของจุด และยังให้ผลลัพธ์ต่างกันจากวิธีการแต่ละแบบ

เช่นกัน (สุเพชร จิระจรกุล, 2552) ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเทคนิคประมาณค่าในช่วง 3 เทคนิค คือ เทคนิค Inverse Distance Weighting (IDW) Spline และ Kriging ตามลำดับ ดังนี้

### 2.7.1 Inverse Distance Weighting (IDW)

IDW เป็นการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation) สามารถใช้เพื่อแก้ไขข้อมูล ตามข้อมูลจากสถานที่ตัวอย่างที่ได้รับพื้นที่การค้นหพื้นที่ใกล้เคียงที่ถูกจำกัด สถานที่ตั้งพื้นฐาน คือ สถานที่ใกล้เคียงที่มีแนวโน้มที่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น และการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นจะทำการถ่วงน้ำหนักข้อมูลที่ถูกแก้ไข  $\hat{Z}(S_0)$  ที่ตำแหน่งที่ไม่ได้สุ่มตัวอย่าง  $S_0$  ตามระยะใกล้เคียงของข้อมูลตัวอย่างที่รู้จัก สามารถคำนวณได้ดังนี้ (Dale & Fortin, 2014)

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{j=1}^m (W_j Z(S_j)) \quad \text{สมการที่ 3}$$

โดยที่  $\hat{Z}(S_0)$  คือ ค่าที่ทำนาย ณ ตำแหน่งที่ไม่ได้สุ่มตัวอย่าง

$Z(S_j)$  คือ ค่าตัวแปร  $Z$  ที่ตำแหน่งตัวอย่าง  $j$

$m$  คือ จำนวนตำแหน่งตัวอย่างที่อยู่ใกล้เคียงตามคำจำกัดความบางอย่าง เช่น อยู่ในรัศมีการค้นหา

$W_j$  คือ น้ำหนักตามระยะทางระหว่างตำแหน่งที่ไม่ได้สุ่มตัวอย่าง และตำแหน่งที่สุ่มตัวอย่าง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\sum_{j=1}^m W_j = 1 \quad \text{สมการที่ 4}$$

รูปแบบที่พบบ่อยที่สุดของ IDW แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{Z}(S_0) = \frac{\sum_{j=1}^m (d_{ij}^{-k} Z(S_j))}{\sum_{j=1}^m d_{ij}^{-k}} \quad \text{สมการที่ 5}$$

โดยที่  $k$  คือ เลขยกกำลัง (ที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1)

$d_{ij}$  คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ไม่ได้สุ่มตัวอย่าง  $i$  และตำแหน่งที่สุ่มตัวอย่าง  $j$

สามารถถ่วงน้ำหนักได้มากขึ้นในตำแหน่งใกล้เคียงโดยการเปลี่ยนค่าของเลขชี้กำลัง  $k$  หากระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่สุ่มตัวอย่าง และตำแหน่งที่ไม่ได้สุ่มตัวอย่างเป็น 0 ค่าที่ถูกแก้ไขจะเป็นค่าที่สังเกตได้ ข้อดีของ IDW คือ อาศัยหลักการที่ว่าตำแหน่งใกล้เคียงกันย่อมมีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในการคำนวณค่า ณ ตำแหน่งที่ต้องการ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับเซลล์ที่ต้องการประมาณค่าจะมี



น้ำหนักความสำคัญมากกว่าตำแหน่งที่ไกลออกไป โดยสามารถเจาะจงจำนวนจุดตำแหน่ง หรืออาจใช้ทุกจุดที่อยู่ในรัศมีที่กำหนดมาคำนวณค่าให้เซลล์ผลลัพธ์ได้ (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552) ดังนั้นจึงรักษาความซับซ้อนของรูปแบบพื้นที่เชิงพื้นที่มากกว่าการวิเคราะห์แนวโน้มของพื้นผิว

### 2.7.2 Spline

Spline เป็นเทคนิคที่ใช้ได้กับวัตถุประสงค์ทั่ว ๆ ไปในการแทรกค่าให้พอดีเป็นพื้นผิวเป็นพื้นผิวที่มีความโค้งเว้าตามจุดข้อมูลตัวอย่างที่นำเข้ามาเหมือนกับการบิดงอของแผ่นยางผ่านจุดตัวอย่าง โดยพยายามให้อย่างน้อยความโค้งทั้งหมดเข้าหาจุดตัวอย่างเหล่านั้นออกมาเป็นพื้นผิว เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ที่สร้างส่วนโค้งเล็ก ๆ บนระนาบสองมิติ หรือแผ่นแบน ๆ เทคนิคการประมาณค่าแบบ Spline นี้สามารถกำหนดจำนวนของจุดตัวอย่างที่นำมาเป็นข้อมูลเข้าได้จากจุดตัวอย่างทั้งหมดที่มี เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ดีที่สุดสำหรับพื้นผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป อย่างเช่น พื้นผิวแสดงความสูง ตารางความลึกของพื้นที่น้อย หรือระดับความเข้มข้นของมลภาวะ แต่จะไม่เหมาะกับบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามาก ๆ ภายในระยะทางสั้น ๆ เพราะจะทำให้เกิดค่าเกิน (Overshoot) ขึ้น (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552)

Spline เป็นการคำนวณข้อมูลพื้นผิวใช้แนวคิดการ Interpolation แบบสมการเส้นตรงเหมาะกับพื้นผิวที่มีความโค้งน้อยที่สุด ตลอดตำแหน่งข้อมูลที่นำเข้า (Input point) (Minimum-Curvature surface) คล้ายกับการโค้งแผ่นยางผ่านจุดที่มีความโค้งรวมน้อยที่สุดของพื้นผิว สร้างพื้นผิวที่ต้องผ่าน Input point การประมาณค่าในช่วงด้วยเทคนิค Spline มี 2 วิธีคือ 1) Regularize ใช้สร้างพื้นผิวเรียบเนียนที่ไล่ระดับความสูง โดยกำหนดค่า Weight ถ้ายิ่งสูงจะยังมีพื้นผิวที่เรียบเนียนโดย ค่าน้ำหนักต้องมากกว่า 0 ไม่เกิน 1 เช่น 0.001 0.1 0.5 ค่าที่ได้อาจตกอยู่ภายนอกจุดตัวอย่างเพื่อทำให้พื้นผิวเรียบเนียน และ 2) Tension ใช้ปรับพื้นผิวที่หยาบว่า Regularize ซึ่งจะให้พื้นผิวเรียบเนียน น้อยกว่า Regularize ข้อมูลจะอยู่ในช่วงที่กำหนด ยิ่งค่าค่าน้ำหนักมาก พื้นผิวหยาบเรียบเนียนน้อยโดยค่าน้ำหนักต้องมากกว่า 0 เช่น 0 1 5 และ 10 (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552)

ทั้ง 2 วิธีนี้ต้องกำหนดจำนวนจุดเพื่อใช้คำนวณ ยิ่งจำนวนจุดมากพื้นผิวยิ่งเรียบเนียนมาก โดยวิธี Spline ดีที่สุดสำหรับพื้นผิวที่ได้ซึ่งจะโค้งไปตามความสูงจริงที่ค่อย ๆ เปลี่ยนแปลง เช่น Elevation Water-table depths Pollution concentration และ จะไม่เหมาะ เมื่อมีการ

เปลี่ยนแปลงมากภายในระยะทางแนวราบที่สั้น หรือชิดกันเกินไป เพราะสามารถประมาณค่าเลยจุดหมาย (Overshoot) (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552)

### 2.7.3 Kriging

เทคนิค Kriging นั้นแตกต่างจากวิธีการสื่อสารในพื้นที่อื่น ๆ เนื่องจากระบบ Kriging สามารถประเมินคุณภาพของการทำนายได้ด้วยข้อผิดพลาดที่คาดการณ์ไว้โดยประมาณ มีต้นกำเนิดมาจากวิศวกรรมเหมืองแร่และธรณีวิทยาในช่วงทศวรรษ 1950 ที่ผ่านมา (Chang, 2019) เป็นวิธีการประมาณค่าที่ทำการสันนิษฐานจากระยะทาง หรือทิศทางระหว่างจุดตัวอย่างแต่ละจุด ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวได้ด้วยเทคนิค Kriging นี้จะทำการเลือกสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับจุดตัวอย่างที่เลือกไว้ หรือจุดตัวอย่างทั้งหมด ภายในรัศมีที่กำหนดเพื่อให้ค่าผลลัพธ์ในแต่ละพื้นที่ออกมา โดยผสมผสานการสำรวจวิเคราะห์ค่าทางสถิติของข้อมูล การทำแบบจำลองแบบ Variogram การสร้างพื้นผิว และยังมีส่วนเสริมให้สามารถตรวจสอบความแปรปรวนของพื้นผิวได้อีกด้วย วิธีการนี้มักนิยมใช้ในกรณีที่ต้องการทราบความสัมพันธ์ของระยะทาง หรือทิศทางที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล โดยมากมักจะใช้ทางปฐพีวิทยาและธรณีวิทยา ในบางกรณีพบว่ายังสามารถใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำฝน (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552)

Kriging เป็นการคำนวณข้อมูลพื้นผิวโดยใช้แนวคิดความสัมพันธ์ของค่า  $Z$  โดยทฤษฎีนี้เชื่อว่า ค่า  $Z$  ย่อมมีความสัมพันธ์ที่สามารถแสดงเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่เป็นเอกลักษณ์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ Kriging จะนำค่า  $Z$  มาคำนวณหาความสัมพันธ์โดยหาค่า Semi Variance แบบ Spherical และคุณลักษณะกราฟว่าสามารถเข้ากับกับสมการใดบ้าง โดยอาจเป็นสมการ Linear Exponential หรือ Gaussian โดยจะตั้งสมมุติฐานให้ระยะทางหรือทิศทางระหว่างจุดตัวอย่างมีผลกระทบต่อความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ผิว และระบุจำนวนของจุดหรือจุดทั้งหมดภายในรัศมีที่ระบุเพื่อกำหนดค่าผลลัพธ์ของแต่ละตำแหน่ง (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552) เทคนิค Kriging ที่นิยมใช้ ได้แก่ Ordinary Kriging เป็นการประมาณค่าโดยไม่ทราบแนวโน้มของชุดข้อมูล และมีการสมมติค่ากลางที่แน่นอนขึ้นมาใช้ และ Universal Kriging เป็นการประมาณค่าโดยสมมติว่าทราบแนวโน้มของข้อมูล ซึ่งอาจให้เหตุผลทางวิทยาศาสตร์ในการอธิบายแนวโน้มดังกล่าว

ปัจจุบันมีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่นำวิธีการประมาณค่าเชิงพื้นที่ในซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้ เช่น การนำไปจัดทำแผนที่แสดงการสึกกร่อนและประเมิน



ความเสี่ยงเชิงพื้นที่ โดยใช้เทคนิค Kriging (de la Fuentea et al., 2013; Simpson & Wu, 2014) การใช้เทคนิค IDW และ Kriging สำหรับการประมาณค่าและทำแผนที่การมีส่วนร่วมของกรดไนตริกต่อการกักตรอนในชั้นบรรยากาศของสังกะสี (Castillo-Miranda, Rodríguez-Gómez, Genescá-Llongueras, Ruiz-Suárez, & García-Reynoso, 2021) การประยุกต์ใช้ GIS และข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) ในการประมาณค่าขึ้นในดินโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่า 4 วิธี คือ IDW Spline Ordinary Kriging และ Kriging with External Drift (KED) (Srivastava et al., 2019) เป็นต้น

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tidblad et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการสึกกร่อนของวัสดุเมื่อได้รับสัมผัสกับมลพิษทางอากาศ ในภูมิภาคเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน โดยมีพื้นที่ศึกษา 12 แห่ง ในทวีปเอเชีย (ประเทศอินเดีย เวียดนาม ไทย มาเลเซีย จีน และฮ่องกง) และอีก 4 แห่งในทวีปแอฟริกา (ประเทศแอฟริกาใต้ แคมเบีย และซิมบับเว) ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทดสอบการสึกกร่อน ประกอบไปด้วย เหล็กกล้าคาร์บอน สังกะสี ทองแดง หินปูน และเหล็กเคลือบสี โดยในแต่ละพื้นที่ที่ทดสอบจะมีการสร้างชั้นวางเพื่อรองรับตัวอย่างวัสดุและอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ (Passive samplers) แสดงดังภาพที่ 2 การเก็บตัวอย่างด้านสิ่งแวดล้อม (สารมลพิษ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน และค่า pH ของน้ำฝน) ดำเนินการทุก 2 เดือน ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างโดยรวมคือ 1 ปี (ค.ศ. 2002-2003) รวม 6 ครั้ง การเตรียมตัวอย่างและการประเมินผลของการสึกกร่อนของแต่ละวัสดุและช่วงเวลาการสัมผัสชุดของตัวอย่างที่เหมือนกัน 3 ชุด (Triplicates) ในแต่ละสถานที่ทดสอบมีตัวอย่างทั้งหมด 9 ตัวอย่าง อนึ่งการทดสอบนี้ไม่สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปพัฒนาฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุเนื่องจากการทดสอบการได้รับสัมผัสในระยะเวลาสั้น (1 ปี) ดังนั้นจึงใช้ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุที่มีอยู่จากโครงการ MULTI-ASSESS เปรียบเทียบค่าที่คาดการณ์กับค่าผลทดลอง เนื่องจากระดับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่วัดได้ค่อนข้างสูงจึงมีความถูกต้องมากกว่าที่จะใช้สมการฟังก์ชันกรณีซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีอิทธิพลหลักที่พัฒนาขึ้นในโครงการ ICP Materials สำหรับสังกะสี ทองแดง และหินปูน สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนใช้ฟังก์ชันที่พัฒนาขึ้นภายใน ISO TC 156 การกักตรอนของโลหะและโลหะผสมดังสมการที่ 6

$$R_{\text{Steel}} = 29.1 + (0.8[\text{SO}_2])^{0.52} e^{0.020\text{Rh} - 0.054(\text{T}-10)} + 0.102\text{D}_{\text{Cl}}^{0.62} e^{0.033\text{Rh} + 0.040\text{T}} \quad \text{สมการที่ 6}$$

โดยที่  $T > 10^\circ\text{C}$

- เมื่อ  $D_{Cl}$  คือ การตกสะสมของคลอไรด์ (มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อวัน)
- $R_{Steel}$  คือ ระดับความลึกของผิวเหล็กกล้าคาร์บอนที่เกิดการสึกกร่อน (ไมโครเมตร)
- $[SO_2]$  คือ ความเข้มข้นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 2 ชั้นวางเพื่อรองรับตัวอย่างวัสดุและอุปกรณ์ตัวอย่างแบบพาสซีฟ  
ที่มา: Tidblad et al. (2007)

หมายเหตุ: a = ตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอน b = ตัวอย่างสังกะสี c = ตัวอย่างทองแดง d = ตัวอย่างเหล็กทาสี  
e = ตัวอย่างหินปูนบนผ้าหมุ่น และ f = อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟสำหรับก๊าซและอนุภาคที่ยึดภายใต้แผ่น  
กลมสำหรับป้องกันฝน

ผลการศึกษาพบว่าค่าการสึกกร่อนที่ได้รับนั้นสูงกว่าที่คาดไว้อย่างมาก สำหรับหินปูน เหล็กกล้าคาร์บอน และทองแดงมีคלותไธล์ของค่าที่ได้จากการทดสอบสูงกว่าค่าที่ทำนาย ขณะที่สังกะสีมีค่าควอไทล์ที่ได้จากการทดสอบต่ำกว่าค่าที่ทำนาย (ตารางที่ 7) โดยให้คำอธิบายเกี่ยวกับค่าสังกะสีที่ต่ำกว่าวัสดุนี้มีความอ่อนไหวเป็นพิเศษต่อสภาวะเริ่มต้นของการได้รับสัมผัส มีค่าที่จะสังเกตเห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบและคาดการณ์ ซึ่งอาจเกิด

ความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากค่าได้ในระยะเวลา 1 ปี ไม่เพียงพอต่อการทำนายค่าได้โดยสมการที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงควรใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 2 - 4 ปี เพื่อใช้ในการประเมินอัตราการสึกกร่อนในเครือข่าย Regional Air Pollution in Developing Countries (RAPIDC) และเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากเครือข่ายอื่น ๆ ในยุโรป

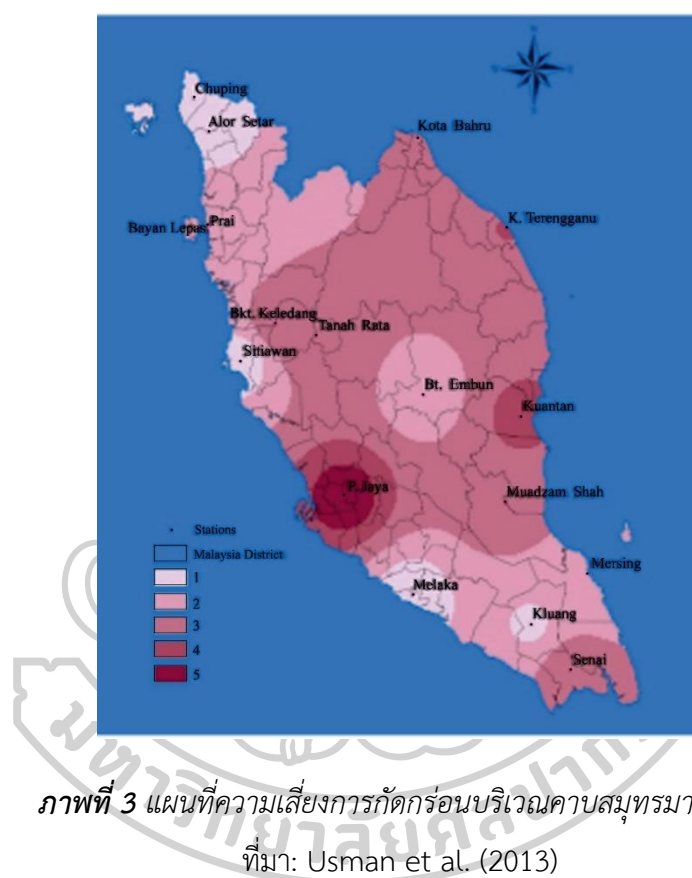
**ตารางที่ 7** ขอบล่าง (Lower quartiles) และขอบบน (Upper quartiles) ของค่าที่ได้จากการทดสอบและค่าที่ทำนายที่ใช้ข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม และฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุจากโปรแกรมการรับสัมผัสอื่น ๆ

วัสดุ	ค่าที่ได้จากการทดสอบ ( $\mu\text{m}$ )	ค่าที่ทำนาย ( $\mu\text{m}$ )	R <sup>2</sup>
เหล็กกล้าคาร์บอน	17-28	9-22	0.79
สังกะสี	0.5-1.0	0.7-1.3	0.58
ทองแดง	0.7-1.5	0.5-1.1	0.27
หินปูน	9-20	3-10	0.74

ที่มา: Tidblad et al. (2007)

Usman, Zakaria, and Omar (2013) ได้นำเสนอการพัฒนาแผนที่ความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนสำหรับคาบสมุทรมาเลเซียโดยใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ร่วมกับข้อมูลมลพิษทางอากาศ และสภาพภูมิอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา มาเลเซีย ข้อมูลมลพิษทางอากาศ ประกอบด้วย การสะสมเกลือไอออนของไนเตรทคลอไรด์และซัลเฟตในรูปแบบของการตกที่เปียก (Wet fall out) และจัดทำแผนที่ความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค IDW และเทคนิคซ้อนทับแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted overlay method) ผลพบว่าความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม 5 ปัจจัย ได้แก่ คลอไรด์ (Cl<sup>-</sup>) ไนเตรต (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ปริมาณน้ำฝน และเวลาแห่งความเปียก (Time of wetness: TOW) จากแผนที่ความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนคาบสมุทรมาเลเซีย (ภาพที่ 3) แบ่งความเสี่ยงในการกัดกร่อน 5 ระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงในสเกล 1 ถึง 5 โดยที่ 1 หมายถึง ความเสี่ยงในการกัดกร่อนที่ต่ำที่สุด และ 5 หมายถึง ความเสี่ยงในการกัดกร่อนสูงสุด จากภาพที่ 3 พบว่าพื้นที่บริเวณเมืองเปตาลิงจายา (Petaling jaya) มีอัตราความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่นของคาบสมุทรมาเลเซีย ซึ่งพื้นที่เปตาลิงจายามีไนเตรทและซัลเฟต ในระดับสูงสุด ตามด้วยพื้นที่บริเวณเมืองกวนตัน (Kuantan) และกัวลาเตอริงกานู (Kuala Terengganu) มีความเสี่ยงในการกัดกร่อนระดับ 4 แม้ว่าความเข้มข้นของไนเตรตและซัลเฟต

อยู่ในระดับต่ำ แต่ความเข้มข้นของคลอไรด์นั้นสูงมากเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น และบริเวณเมืองกลวง (Kluang) ซิตีอวัน (Sitiawan) และอาโลร์เซตาร์ (Alor Setar) เป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่ำที่สุดต่อการกักกรองน เนื่องจากพื้นที่เหล่านี้พบมลพิษทางอากาศน้อยมาก ในช่วงที่มีความชื้น คลอไรด์ ในเตรต และซัลเฟต ในบริเวณนี้ค่าต่ำ ดังนั้นบริเวณเมืองกลวง ซิตีอวัน และอาโลร์เซตาร์ จึงมีความเสี่ยงในการกักกรองนที่ต่ำที่สุด



ภาพที่ 3 แผนที่ความเสี่ยงการกักกรองนบริเวณคาบสมุทรมาเลเซีย

ที่มา: Usman et al. (2013)

Ferhat (2013) ทำการประเมินระดับการสึกกร่อนของโบราณในพื้นที่ประวัติศาสตร์ของเมืองอิสตันบูล ประเทศตุรกี ซึ่งเป็นหนึ่งในเขตชุมชนเมืองที่มีเอกลักษณ์และเก่าแก่ที่สุดในโลก โดยทำการรวบรวมข้อมูลคุณภาพอากาศจากมลพิษทางอากาศมากกว่า 50 สถานีที่กระจายอยู่ในพื้นที่ศึกษา (ข้อมูลที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ ข้อมูลในช่วงเดือนเมษายน ค.ศ. 2010 - เดือนมกราคม ค.ศ. 2011 โดยจำแนกเป็น 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูใบไม้ผลิ ฤดูร้อน และฤดูหนาว) จากนั้นทำการสร้างแผนที่มลพิษทางอากาศ และแผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถาน โดยใช้ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุของ (European Union, 2005) ด้วยเทคนิค Kriging Interpolation และทำการวิเคราะห์ความเสี่ยงการ

สีกร่อนโบราณสถาน โดยผลการศึกษาพบว่า โบราณสถานของอิสตันบูลอยู่ภายใต้ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการสีกร่อนที่ควบคุมโดยการปฏิกิริยาทางเคมีภายใต้สถานการณ์หลายมลพิษที่เกิดจากมลพิษทางอากาศ และปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ซึ่งความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในพื้นที่ประวัติศาสตร์ของเมืองอิสตันบูลในฤดูใบไม้ผลิ ฤดูร้อน และฤดูหนาว พบว่าไม่มีความแตกต่างของฤดูกาลอย่างชัดเจนระหว่างช่วงการเปลี่ยนผ่านและฤดูร้อนในขณะที่ฤดูหนาวแตกต่างกันเล็กน้อย บริเวณที่มีค่าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงอย่างเห็นได้ชัด คือ พื้นที่บริเวณนี้มีแหล่งกำเนิดสารมลพิษจากการจราจรเนื่องจากเป็นสะพานเชื่อมต่อบนทางด่วนที่มีการจราจรหนาแน่นมาก อาจมีสาเหตุจากกิจกรรมการจราจรในเวลากลางวัน ความเข้มข้นของโอโซนในช่วงฤดูหนาวและฤดูใบไม้ผลิ บริเวณตอนปลายของพื้นที่มีระดับความเข้มข้นสูง โดยความเข้มข้นของโอโซนที่สูงขึ้นในอิสตันบูล มักเกิดขึ้นภายใต้สภาพลมต่ำลมตะวันตกเฉียงใต้และลมตะวันตกเฉียงใต้และลมตะวันตกเช่นเดียวกับสภาพสงบ และความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์มีความคล้ายคลึงกันกับการกระจายการสัมผัสซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เหตุผลหลักสำหรับความคล้ายคลึงกัน คือ แหล่งที่มาทั่วไปของมลพิษทั้งสอง (ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) มีสาเหตุมาจากการจราจร ความแตกต่างกันที่ซัลเฟอร์ออกไซด์ (ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ส่วนใหญ่) จะถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ของสารประกอบที่มีส่วนผสมของกำมะถันในเชื้อเพลิงฟอสซิล (ในกรณีนี้คือการเผาไหม้น้ำมันดีเซลที่มีคุณภาพต่ำ) ในขณะที่ไนโตรเจนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยออกมาในทุกประเภทของการเผาไหม้ ซึ่งจากการประมาณค่าการสีกร่อนของวัสดุแต่ละชนิด พบว่า อัตราการสีกร่อนหินปูนพอร์ตแลนด์สูงกว่าระดับค่าการสีกร่อนพื้นฐานแต่ไม่เกินระดับการสีกร่อนที่ยอมรับได้ จากแผนที่การสีกร่อนของหินปูนพอร์ตแลนด์ (ภาพที่ 4) และตารางที่ 8 สรุปได้ว่าโบราณสถานที่ทำจากหินปูนพอร์ตแลนด์ไม่ตกอยู่ในความเสี่ยงต่อการสีกร่อน

ค่าการสีกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนชั้นต่ำอยู่ที่ 28.9 ไมโครเมตรต่อปี ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์อัตราการสีกร่อนที่ยอมรับได้ มีค่าการสีกร่อนเหล็กกล้าคาร์บอนเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ประมาณสองเท่า ซึ่งให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อการสีกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนอย่างรุนแรงทั่วทั้งพื้นที่และอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้โดยเฉพาะบริเวณตอนบนสุดของพื้นที่ (ภาพที่ 5) ที่ซึ่งมีอุทยาน โบราณคดี และสินทรัพย์ที่สำคัญ ๆ ตั้งอยู่

จากแผนที่การสีกร่อนของทองแดง (ภาพที่ 6) พบว่ามีพื้นที่ที่มีการสีกร่อนสูง 2 บริเวณ คือ บริเวณเหนือปลายพื้นที่ (สถานีที่ 33-35) และบริเวณเนินเขาทางใต้ของพื้นที่และอื่น ๆ ที่อยู่รอบ



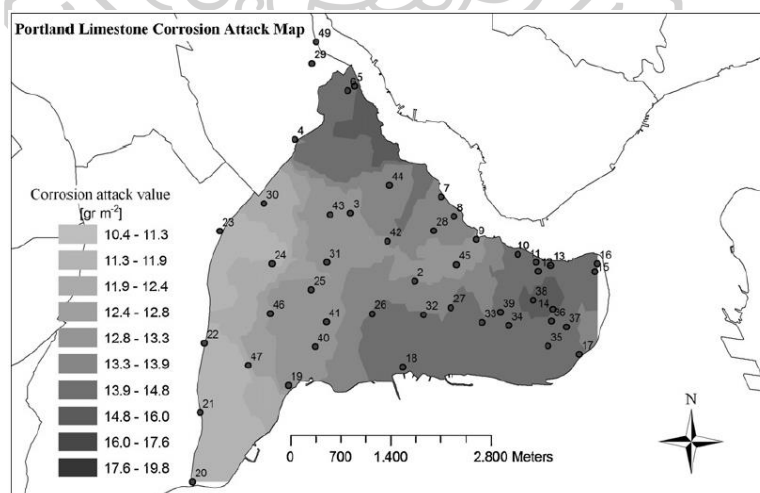
ๆ สถานีที่ 4-6 มีโบราณสถานจำนวนมากในพื้นที่นี้ เช่น โบสถ์ฮาเกียไอรีน มัสยิดสีน้ำเงินหรือมัสยิดสุลต่านอาห์เมต และพระราชวังโทพคาปี ระดับการสึกกร่อนทองแดงที่คำนวณได้ในพื้นที่นี้สูงกว่าระดับที่ยอมรับได้ (ตารางที่ 8) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งซัลเฟอร์ไดออกไซด์และโอโซนเป็นปัจจัยหลักที่เพิ่มความเสียหายของการสึกกร่อนของทองแดงภายใต้สภาพอุตุนิยมวิทยา

การสึกกร่อนของสัมฤทธิ์หล่อแสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งพบว่ามีความคล้ายคลึงกับกรณีของทองแดง (ภาพที่ 6) ระดับความเสี่ยงการสึกกร่อนสัมฤทธิ์หล่อพบว่ามีค่าสูงที่สุดในพื้นที่ประวัติศาสตร์เมืองอิสตันบูล ประเทศตุรกี ระดับการสึกกร่อนของสัมฤทธิ์หล่อต่ำสุดนั้นสูงกว่าระดับพื้นฐานของการสึกกร่อน และค่าเฉลี่ยสูงกว่าระดับการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ประมาณสองเท่า

**ตารางที่ 8** ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการสึกกร่อนที่วัดได้ในพื้นที่ประวัติศาสตร์ของอิสตันบูล (ไมโครเมตรต่อปี)

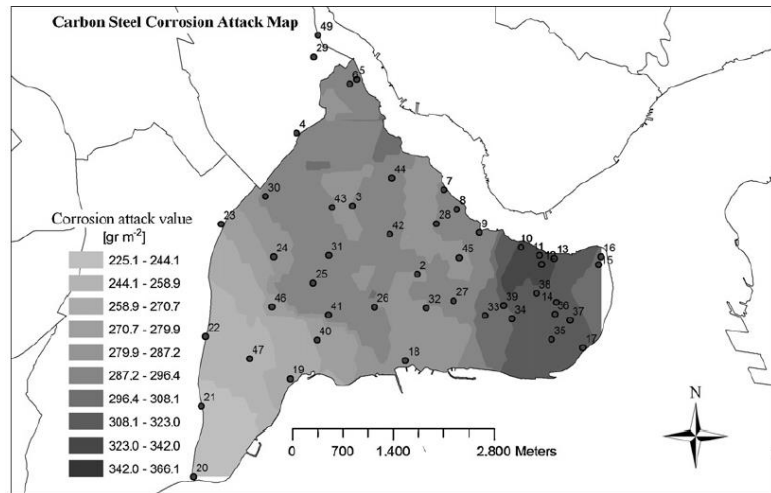
วัสดุ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เหล็กกล้าคาร์บอน	28.9	51.4	37.3	4.62
ทองแดง	0.79	2.13	1.09	0.25
สัมฤทธิ์หล่อ	0.80	1.88	1.15	0.22
หินปูนพอร์ตแลนด์	3.99	7.59	5.17	0.69

ที่มา: Ferhat (2013)

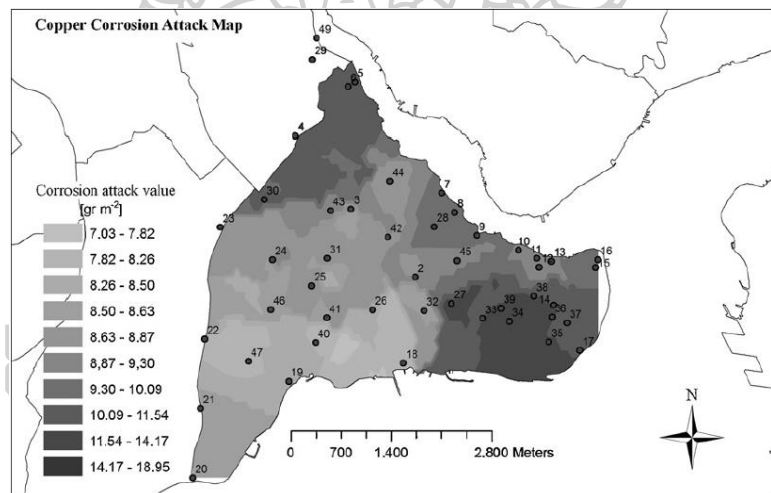


**ภาพที่ 4** แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์

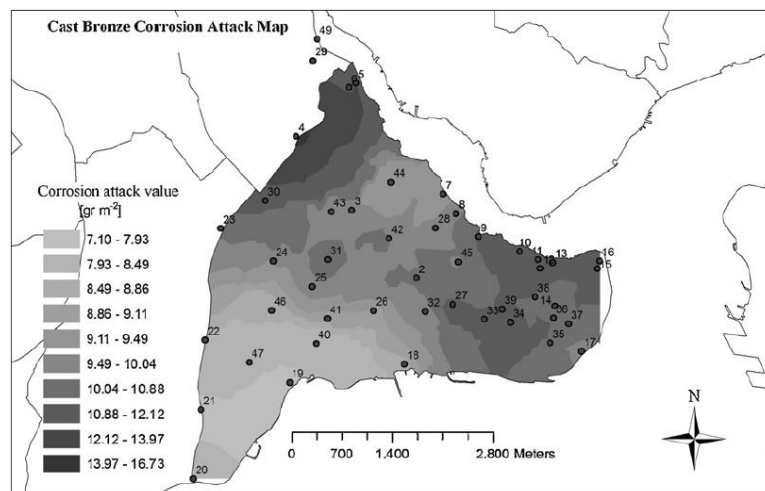
ที่มา: Ferhat (2013)



ภาพที่ 5 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน  
ที่มา: Ferhat (2013)



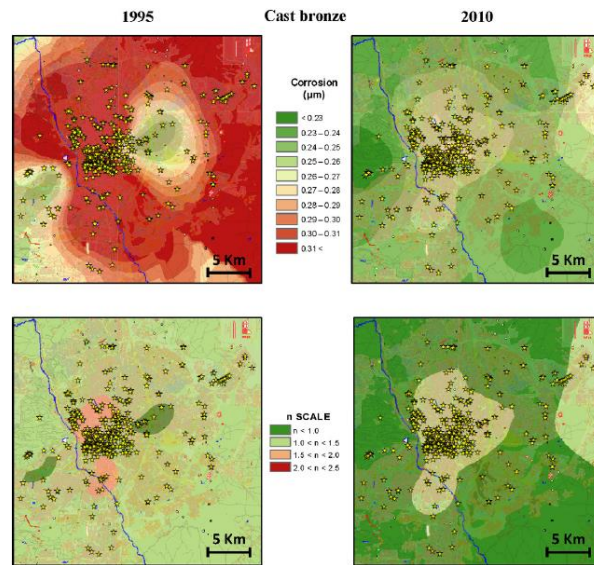
ภาพที่ 6 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุทองแดง  
ที่มา: Ferhat (2013)



ภาพที่ 7 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุสัมฤทธิ์หล่อ  
ที่มา: Ferhat (2013)

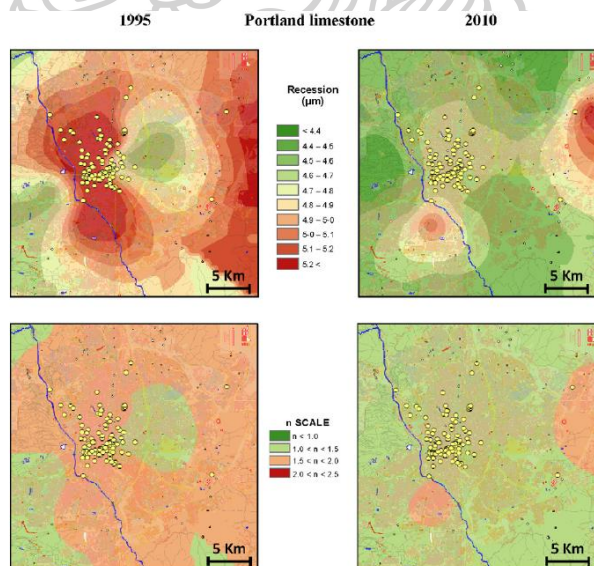
de la Fuentea et al. (2013) ที่ได้ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลคุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศขององค์กรส่วนท้องถิ่นเมืองมาดริด ประเทศสเปน และข้อมูลโบราณสถานทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยเทคนิค Kriging Interpolation และจัดทำแผนที่การกระจายตัวของมลพิษทางอากาศและแผนที่ผลกระทบมลพิษทางอากาศในการเสื่อมสภาพของโบราณสถานในอดีตปี ค.ศ. 1995-2010 และสถานการณ์ในอนาคตที่เป็นไปได้ (ปี ค.ศ. 2025) เพื่อระบุตัวบ่งชี้ และเกณฑ์ระดับมลพิษทางอากาศด้วยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ พร้อมทั้งวิเคราะห์ความเสี่ยงของอัตราการสึกกร่อนโบราณสถานโดยใช้เกณฑ์การวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้จากโครงการ Multi-Assess (ดังแสดงในตารางที่ 6) ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโบราณสถานของเมืองมาดริด ที่นำมาประเมินประกอบด้วย ทองสัมฤทธิ์หล่อและหินปูนพอร์ตแลนด์ ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การสึกกร่อนของวัสดุดังกล่าว อยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับแต่ละวัสดุ (0.6 และ 8.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ) แสดงดังภาพที่ 8 และ 9 พบว่า ในปี ค.ศ. 1995 กรณีสัมฤทธิ์หล่อและหินปูนพอร์ตแลนด์ โบราณสถานส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อัตราการสึกกร่อนต่ำกว่าค่าการสึกกร่อนที่ยอมรับได้แต่มีโบราณสถานบางส่วนที่มีความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนค่อนข้างสูง และในปี ค.ศ. 2010 โบราณสถานทั้งหมดตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อัตราการสึกกร่อนต่ำกว่าค่าการสึกกร่อนที่ยอมรับได้





ภาพที่ 8 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุสัมฤทธิ์หล่อปี ค.ศ. 1995 (บนซ้าย) และ 2010 (บนขวา) และแผนที่ n-factor สำหรับวัสดุสัมฤทธิ์หล่อในปี ค.ศ. 1995 (ซ้ายล่าง) และ 2010 (ขวาล่าง)

ที่มา: de la Fuentea et al. (2013)

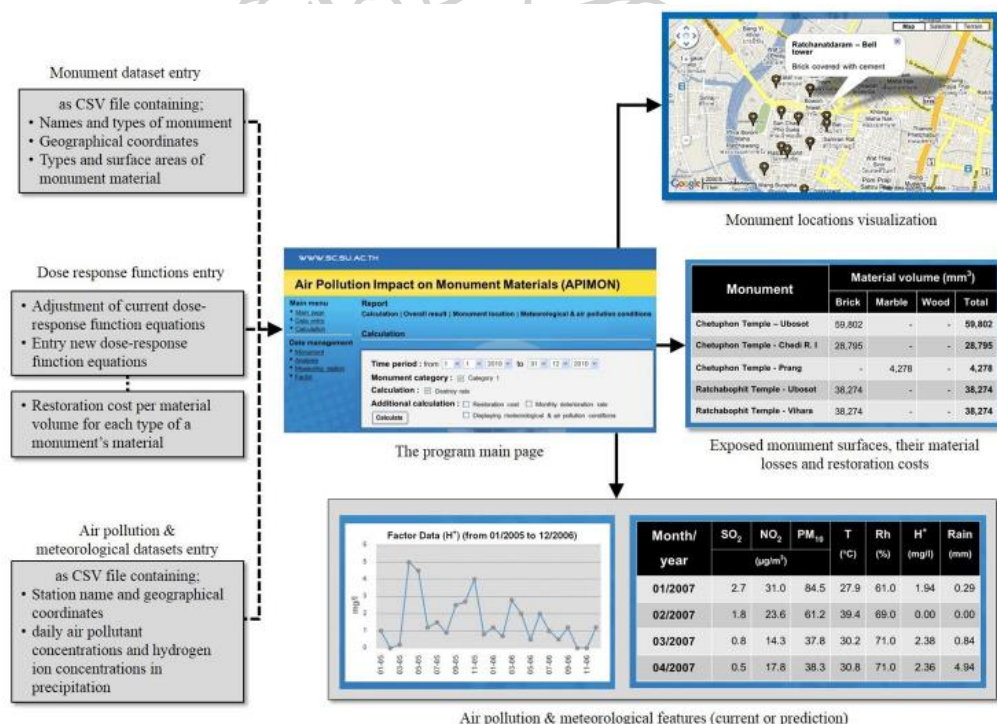


ภาพที่ 9 แผนที่การสึกกร่อนของโบราณสถานจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์ ปี ค.ศ. 1995 (บนซ้าย) และ 2010 (บนขวา) และแผนที่ n-factor สำหรับวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์ ในปี ค.ศ. 1995 (ซ้ายล่าง) และ 2010 (ขวาล่าง)

ที่มา: de la Fuentea et al. (2013)

หมายเหตุ: สัญลักษณ์รูปดาวสีเหลือง คือ วัตถุโบราณสถานที่เคลื่อนย้ายได้ซึ่งทำจากสัมฤทธิ์

Onchang and Hawker (2019) ได้นำฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุของโครงการ Multi-Assess (European Union, 2005; Kucera, 2014) (ดังแสดงในตารางที่ 3) มาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประมาณค่าการสึกกร่อนของโบราณสถาน โดยได้ออกแบบให้สามารถนำเข้าข้อมูลมลพิษทางอากาศและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ใกล้ที่สุดโดยอัตโนมัติ และประเมินการเสื่อมสภาพในแง่ของการสูญเสียปริมาณวัสดุจากการกัดกร่อนและประเมินค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ได้นำไปใช้ในการประเมินความเสี่ยงโทรมของโบราณสถานทางพุทธศาสนาที่ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน กรุงเทพมหานคร โดยเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับโบราณสถานจำนวน 75 แห่งซึ่งตั้งอยู่ในศาสนาสถานจำนวน 12 แห่ง ผลลัพธ์ของโปรแกรม (ภาพที่ 10) ให้ข้อมูล 3 ชุด คือ 1) การแสดงสถานที่ตั้งของโบราณสถานในพื้นที่ศึกษา 2) พื้นผิววัสดุโบราณสถานสัมผัส ปริมาณการสูญเสียสะสม (ลูกบาศก์เมตร) ของแต่ละประเภทในช่วงระยะเวลาที่กำหนดและค่าพื้นที่ผิวที่เกี่ยวข้องสำหรับแต่ละโบราณสถาน และ 3) การแสดงแบบตารางและแบบกราฟิกของมลพิษทางอากาศ และพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยา (ปัจจุบันหรือที่คาดการณ์)



ภาพที่ 10 ข้อมูลนำเข้าและผลลัพธ์ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

ที่มา: Onchang and Hawker (2019)

ผลพบว่าการสูญเสียวัสดุสะสมทั้งหมดจากโบราณสถานทั้งหมดในช่วง 7 ปี (ค.ศ. 2005 ถึง 2011) อยู่ที่ประมาณ 410 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูโดยรวมประมาณ 210,000 ดอลลาร์สหรัฐ

งานวิจัยของ Ferhat (2013) และ de la Fuentea et al. (2013) เลือกวิธีการ Kriging เพื่อประมาณค่าเชิงพื้นที่ของมลพิษทางอากาศ และประมาณค่าเชิงพื้นที่การสึกกร่อนของโบราณสถาน โดยให้เหตุผลว่าวิธี Kriging มีขั้นตอนผสมผสานระหว่างการสำรวจวิเคราะห์ค่าทางสถิติของข้อมูล การทำแบบจำลอง Variogram และการสร้างพื้นผิว โดยสามารถตรวจสอบความแปรปรวนหรือความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวได้ การศึกษาทั้งสองข้างต้นไม่ได้มีการใช้ตัวชี้วัดทางสถิติในการประเมินวิธีการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าเพื่อให้ได้วิธีที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ จึงได้ทำการคัดเลือกด้วยวิธีการทางสถิติ โดยการศึกษานี้ได้นำวิธีการประมาณค่าเชิงพื้นที่ 4 วิธี ประกอบด้วย IDW Spline Ordinary Kriging และ Universal Kriging มาทำการประมาณความเข้มข้นของสารมลพิษแต่ละชนิดเทียบกับข้อมูลจากการตรวจวัด และใช้ตัวชี้วัดทางสถิติเพื่อพิจารณาหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานเชิงพื้นที่



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูล อุปกรณ์ และโปรแกรมที่ใช้ทำการวิจัย และขั้นตอนการวิเคราะห์ ที่ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย การดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ การประมาณค่าเชิงพื้นที่ของความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศแต่ละชนิดในแต่ละสถานีตรวจวัดด้วยเทคนิค Interpolation พิจารณาคัดเลือกความเหมาะสมของเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ การคำนวณค่าการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานด้วยฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ ประมาณค่าเชิงพื้นที่การสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานด้วยเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสม การประเมินความเสี่ยงของอัตราการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถาน และคาดการณ์การอัตราการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานในอนาคต ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 ข้อมูล อุปกรณ์ และซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำการวิจัย

##### 3.1.1 ข้อมูลทุติยภูมิ ประกอบไปด้วย

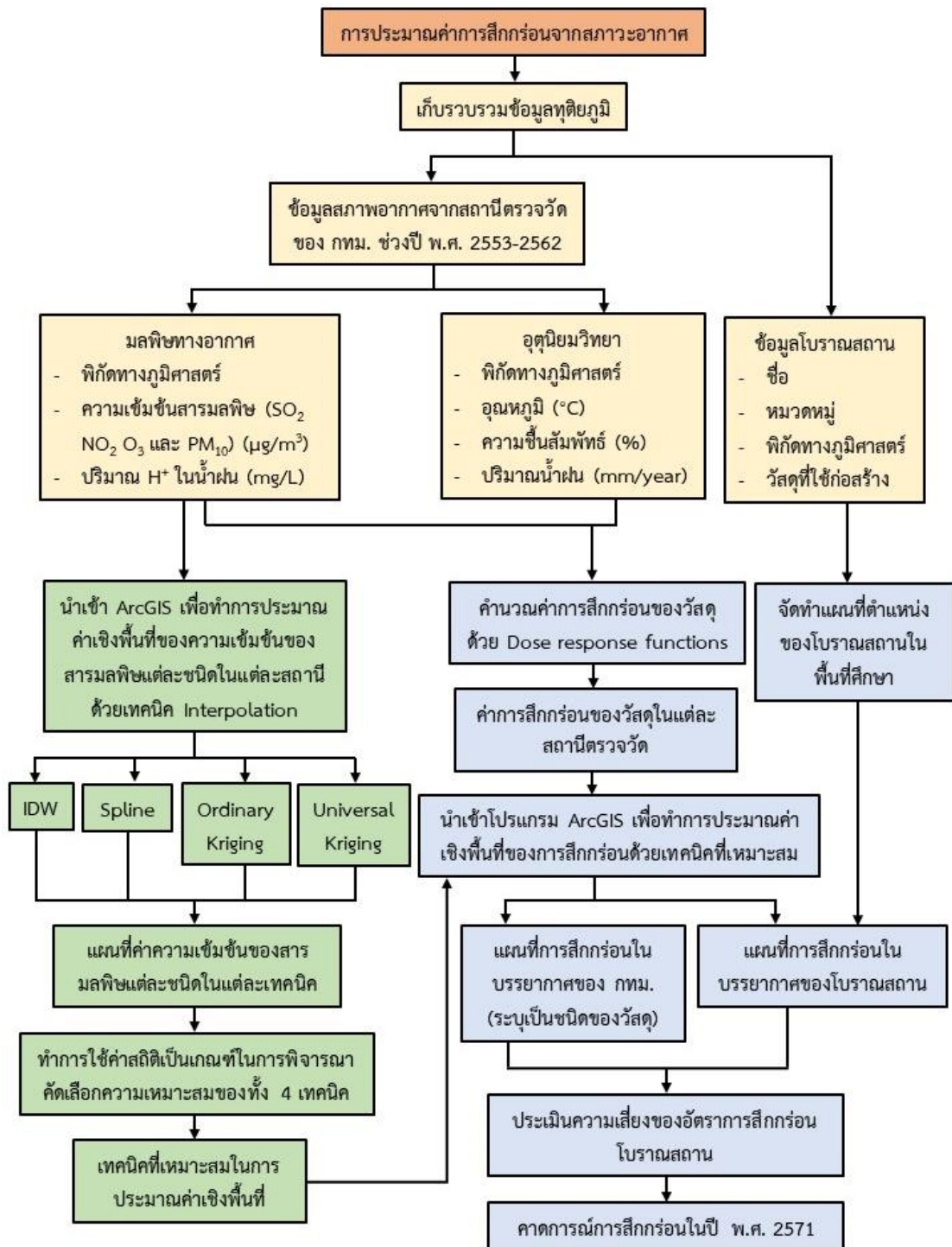
3.1.1.1 ข้อมูลเชิงพื้นที่ ได้แก่ ข้อมูลพื้นที่แขวง ทั้งหมด 180 แขวง 50 เขต ในกรุงเทพมหานคร จากศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์กรุงเทพมหานคร ข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของโบราณสถานประเภทศาสนสถานจำนวน 12 แห่ง จากสำนักงานโบราณคดี กรมศิลปากร และข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ จากกรมควบคุมมลพิษ

3.1.1.2 ข้อมูลคุณลักษณะ ได้แก่ ชื่อ หมวดหมู่ และวัสดุที่ใช้ก่อสร้างโบราณสถาน จากสำนักงานโบราณคดี กรมศิลปากร ข้อมูลคุณภาพอากาศ ประกอบไปด้วย (1) ข้อมูลอุณหภูมิจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน จากกรมอุตุนิยมวิทยา และ (2) ข้อมูลมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ความเข้มข้นสารมลพิษ ( $\text{SO}_2$   $\text{NO}_2$   $\text{O}_3$  และ  $\text{PM}_{10}$ ) ปริมาณไฮโดรเจนไอออนในน้ำฝน จากกรมควบคุมมลพิษ

##### 3.1.2 อุปกรณ์ และซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำการวิจัย

- (1) เครื่องคอมพิวเตอร์
- (2) ซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ArcMap เวอร์ชัน 10.1
- (3) ซอฟต์แวร์ Google Earth
- (4) ซอฟต์แวร์ ไมโครซอฟท์ เอ็กเซล เวอร์ชัน 2016





ภาพที่ 11 แผนผังวิธีการดำเนินงาน

### 3.2 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาแสดงตามแผนผังวิธีการดำเนินงาน (ภาพที่ 11) ประกอบด้วย

- การดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ
- การประมาณค่าเชิงพื้นที่ของความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศแต่ละชนิดในแต่ละสถานีตรวจวัดด้วยเทคนิค Interpolation
- การพิจารณาคัดเลือกความเหมาะสมของวิธีการการประมาณค่าเชิงพื้นที่
- การคำนวณค่าการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานด้วยฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ
- การประมาณค่าเชิงพื้นที่การสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถาน
- การประเมินความเสี่ยงของอัตราการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถาน
- การคาดการณ์การอัตราการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานในอนาคต (ปี พ.ศ. 2571)

โดยแต่ละขั้นตอน มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 การดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ ประกอบด้วย

3.2.1.1 ข้อมูลสภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดของกรุงเทพมหานคร ช่วงปี พ.ศ. 2553-2562 ประกอบไปด้วย (1) ข้อมูลมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ความเข้มข้นสารมลพิษ ( $\text{SO}_2$   $\text{NO}_2$   $\text{O}_3$  และ  $\text{PM}_{10}$ ) ปริมาณไฮโดรเจนออกไซด์ในน้ำฝน จากกรมควบคุมมลพิษ และ (2) ข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัย ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิตามความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน และข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีอุตุนิยมหาวิทยาลัย

3.2.1.2 ข้อมูลโบราณสถาน ได้แก่ ข้อมูลชื่อ หมวดหมู่ และวัสดุที่ใช้ก่อสร้างโบราณสถาน และข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ศึกษาโบราณสถานประเภทศาสนสถานจำนวน 12 แห่ง

3.2.2 ประมาณค่าเชิงพื้นที่ของความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศแต่ละชนิดในแต่ละสถานีตรวจวัดด้วยเทคนิค Interpolation

นำเข้าข้อมูลมลพิษทางอากาศจากสถานีตรวจวัดของกรุงเทพมหานคร ช่วงปี พ.ศ. 2553-2562 ได้แก่ ข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ความเข้มข้นสารมลพิษ ( $\text{SO}_2$   $\text{NO}_2$   $\text{O}_3$  และ  $\text{PM}_{10}$ ) ในซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ArcMap เวอร์ชัน 10.1 ทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศแต่ละชนิดในแต่ละสถานี

ตรวจวัดด้วยเทคนิค Interpolation ทั้ง 4 เทคนิค ได้แก่ เทคนิค IDW Spline Ordinary Kriging และ Universal Kriging ตามลำดับ

### 3.2.3 พิจารณาคัดเลือกความเหมาะสมของเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าเชิงพื้นที่

ทำการพิจารณาคัดเลือกความเหมาะสมของเทคนิคในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ ซึ่งประกอบไปด้วย Fractional bias (FB) Geometric mean bias (MG) ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยแบบบรรทัดฐาน (Normalized mean square error: NMSE) Geometric variance (VG) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: R) และ Fraction of predictions within a factor of two of observations (FAC2) โดยมีรายละเอียดของแต่ละตัวชี้วัดดังนี้

3.2.3.1 *Fractional bias (FB)* เป็นตัวชี้วัดค่าเฉลี่ยของอคติเชิงสัมพัทธ์ และบ่งชี้ข้อผิดพลาดอย่างเป็นระบบ ซึ่งหมายถึงความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าที่ทำนาย และค่าที่สังเกตได้ FB ขึ้นอยู่กับสเกลเชิงเส้น โดยค่า FB มีค่ายิ่งต่ำยิ่งมีความถูกต้อง ถ้าเท่ากับ 0 หมายถึงวิธีการในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่ทำนายค่าได้ถูกต้อง แม่นยำในทางปฏิบัติ หากมีค่าติดลบ (-) บ่งชี้ว่าค่าที่ทำนายสูงกว่า (Over-prediction) ค่าที่ตรวจวัด FB สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) (Dixon & Uddameri, 2016)

$$FB = \frac{\bar{C}_o - \bar{C}_p}{0.5(\bar{C}_o + \bar{C}_p)}$$

สมการที่ 7

โดยที่  $C_o$  คือ ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

$C_p$  คือ ค่าที่ทำนาย

$\bar{C}_o$  คือ ค่าเฉลี่ยค่าที่ได้จากการตรวจวัด

$\bar{C}_p$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่ทำนาย

3.2.3.2 *Geometric mean bias (MG)* เป็นดัชนีสำหรับการกำหนดรูปแบบของการประเมินค่าสูงเกินไป (Overestimation) ของเทคนิคในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ หรือการประเมินค่าต่ำเกินไป (Underestimation) หรือการกระจาย รูปแบบของความลำเอียง (Bias) นี้มีความเหมาะสมเนื่องจากการคาดการณ์ และการคาดการณ์มากเกินไปนั้นให้น้ำหนักที่เท่ากัน เทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมจะมี MG เท่ากับ 1 แต่ MG เท่ากับ 1 ไม่ได้หมายความว่า การคาดการณ์ตรงกับการตรวจวัด หากค่าของ MG มากกว่า 1 แสดงว่ารูปแบบนั้นประเมินค่าเกินจริง ถ้า MG น้อยกว่า 1



เทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่จะประเมินค่าต่ำไป MG สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) (Dixon & Uddameri, 2016)

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p}) \quad \text{สมการที่ 8}$$

3.2.3.3 *Normalized Mean Square Error (NMSE)* เป็นการประมาณ ความเบี่ยงเบนโดยรวมระหว่างค่าที่ทำนายและค่าที่ตรวจวัดได้ เทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสม จะมี NMSE เท่ากับ 0 หากมี NMSE ต่ำมากแสดงว่ามีประสิทธิภาพทั้งในเชิงพื้นที่ และเวลา กรณีที่ค่า NMSE สูงไม่ได้จำเป็นต้องหมายความว่าเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่นั้นไม่เหมาะสมทั้งหมด หาก NMSE มีมากกว่า 1.0 สามารถอนุมานได้ว่าการกระจายของข้อมูลแบบไม่ปกติ แต่ใกล้เข้าสู่ปกติ (เช่น ค่าต่ำมาก และค่าน้อยมาก) NMSE สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) (Dixon & Uddameri, 2016))

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\overline{C_o} \overline{C_p}} \quad \text{สมการที่ 9}$$

3.2.3.4 *Geometric variance (VG)* เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่วัดการกระจายของค่าการทำนาย โดยค่า VG มีค่ายิ่งต่ำยิ่งมีความถูกต้อง VG สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10) (Dixon & Uddameri, 2016)

$$VG = \exp[(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p})^2] \quad \text{สมการที่ 10}$$

3.2.3.5 *Correlation coefficient (R)* เป็นการวัดว่าค่าที่ทำนายจากเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่นั้นสัมพันธ์กับข้อมูลที่สังเกตได้ดีเพียงใด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 หากค่าที่ทำนายมีความสัมพันธ์กับค่าที่ตรวจวัดพอดีที่เทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมมาก ค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าเข้าใกล้ 1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11) (Dixon & Uddameri, 2016)

$$R = \frac{(\overline{C_o - C_o})(\overline{C_p - C_p})}{\sigma_{C_p} \sigma_{C_o}} \quad \text{สมการที่ 11}$$

โดยที่  $\sigma_C$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดย  $\sigma_{C_o}$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จากการตรวจวัด และ  $\sigma_{C_p}$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ทำนาย

3.2.3.6 *Fraction of predictions within a factor of two of observations (FAC2)* คือ การประเมินระดับการกระจายตัวของเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ เทคนิคการ

ประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมจะมี FAC2 เท่ากับ 1.0 และหาก FAC2 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 แสดงว่าเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพดี FAC2 สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (12) (Dixon & Uddameri, 2016)

FAC2 = fraction of data that satisfy

$$0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0 \quad \text{สมการที่ 12}$$

ภายหลังจากได้เทคนิคที่เหมาะสมในการประมาณค่าเชิงพื้นที่แล้วขั้นตอนต่อมา คือ การคำนวณค่าการสึกกร่อนของวัสดุด้วยฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ

### 3.2.4 คำนวณค่าการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานด้วยฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ

นำเข้าข้อมูล ที่เป็นตัวแปรในการคำนวณการสึกกร่อนของวัสดุ ประกอบไปด้วย (1) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน และ (2) ข้อมูลมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ความเข้มข้นสารมลพิษ ( $\text{SO}_2$   $\text{NO}_2$   $\text{O}_3$  และ  $\text{PM}_{10}$ ) ปริมาณไฮโดรเจนไอออนในน้ำฝน บันทึกในซอฟต์แวร์ ไมโครซอฟท์ เอ็กเซล เวอร์ชัน 2013 และคำนวณค่าการสึกกร่อนวัสดุแต่ละชนิดด้วยฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุที่นำมาสร้างสมการในการคำนวณในซอฟต์แวร์ ไมโครซอฟท์ เอ็กเซล เวอร์ชัน 2013

### 3.2.5 ประมาณค่าเชิงพื้นที่ของการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานด้วยเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสม

นำเข้าข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ และข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ศึกษาโบราณสถานประเภทศาสนสถานจำนวน 12 แห่งเข้าสู่ซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ArcMap เวอร์ชัน 10.1 เพื่อจัดทำแผนที่ตำแหน่งของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศและแผนที่ตำแหน่งของโบราณสถานในพื้นที่ศึกษา จากนั้นนำเข้าข้อมูลค่าการสึกกร่อนของวัสดุแต่ละชนิดที่คำนวณจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ (ขั้นตอนที่ 3.2.4) ทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของการสึกกร่อนวัสดุในบรรยากาศของกรุงเทพมหานคร และการสึกกร่อนวัสดุของพื้นที่ศึกษาโบราณสถานด้วยเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมที่ได้จากการพิจารณาคัดเลือกโดยการใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ (จากขั้นตอนที่ 3.2.3)

### 3.2.6 ประเมินความเสี่ยงของอัตราการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถาน

เมื่อทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่การสึกกร่อนโบราณสถานด้วยวิธีการการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมแล้ว ทำการประเมินความเสี่ยงของอัตราการสึกกร่อนโบราณสถานซึ่งเกณฑ์ค่าที่ยอมรับได้สำหรับการสึกกร่อนโบราณสถานแสดงดังตารางที่ 3 อนึ่งเกณฑ์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ที่นำมาใช้นี้ ได้มาจากสมการที่มาจากการศึกษาในประเทศกลุ่มยุโรป ซึ่งมีสภาพอากาศที่แตกต่างจากประเทศไทยดังนั้นผลที่ได้จากการคำนวณย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

### 3.2.7 คาดการณ์การอัตราการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานในอนาคต (ปี พ.ศ. 2571)

เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์การสึกกร่อนโบราณสถานในอนาคตควรคำนึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและปริมาณสารมลพิษในอากาศ โดยทำการคาดการณ์เกี่ยวกับแนวโน้มของสถานการณ์การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าการตรวจวัดคุณภาพอากาศในช่วงปี พ.ศ. 2562-2571 ติดตามจากแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าจากการตรวจวัดคุณภาพอากาศในช่วงปี พ.ศ. 2553-2562 ด้วยวิธี Forecast ในไมโครซอฟต์เอกซ์เซล (Microsoft Excel) ซึ่งเป็นวิธีการปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบทริปเปิล (Exponential Triple Smoothing : ETS) (Microsoft, 2021) เพื่อใช้ในการคำนวณการอัตราการสึกกร่อนโบราณสถานและทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของการสึกกร่อนของวัสดุในอนาคต (ปี พ.ศ. 2571)



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาเริ่มจากการพิจารณาความเหมาะสมของเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ จากนั้นจะกล่าวถึงการประมาณค่าผลกระทบจากมลพิษทางอากาศต่อการสีกร่อนของโบราณสถาน ในกรุงเทพมหานคร โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศเชิงพื้นที่ ผลการประมาณค่าระดับการสีกร่อนเชิงพื้นที่ และความเสี่ยงต่ออัตราการสีกร่อน สถานการณ์ในอนาคต และการสีกร่อนของวัสดุโบราณสถานในพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นใน

#### 4.1 ความเหมาะสมของเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่

ผลการพิจารณาคัดเลือกความเหมาะสมของเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าเชิงพื้นที่โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ พบว่า เทคนิคที่เหมาะสมในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของความเข้มข้นสารมลพิษทางอากาศของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โอโซน และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน คือ เทคนิค IDW (แสดงผลดังตารางที่ 9) อนึ่งก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เทคนิคที่เหมาะสมในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ คือ เทคนิค Kriging ทั้งนี้เนื่องจากมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้มีการนำเทคนิค IDW มาทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ เช่น การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของการแพร่กระจายของสารที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศในพื้นที่กรุงเทพมหานคร (Pharasit & Chaiyakarm, 2020) การทำนายดัชนีคุณภาพอากาศ โดยใช้เทคนิคภูมิสารสนเทศ IDW ในกัวลาลัมเปอร์ ประเทศมาเลเซีย (Jumaah, Ameen, Kalantar, Rizeei, & Jumaah, 2019) และงานวิจัยของ Vorapracha, Phonprasert, Khanaruksombat, and Pijarn (2015) ที่ได้ทำการเปรียบเทียบเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ 3 เทคนิค คือ เทคนิค IDW Ordinary Kriging (OK) และ Universal Kriging (UK) สำหรับทำนายความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน และสรุปผลว่า IDW เป็นวิธีการแก้ไขที่ดีที่สุดในการคาดการณ์สภาวะมลพิษทางอากาศมากกว่าวิธี Ordinary Kriging (OK) และ Universal Kriging (UK) โดยใช้รากที่สองค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) เป็นตัวชี้วัดความถูกต้อง เป็นต้น เทคนิค IDW มักใช้สำหรับการประเมินมลพิษทางอากาศเชิงพื้นที่ (Jumaah et al., 2019; Pharasit & Chaiyakarm, 2020) ซึ่งเป็นไปตามผลการพิจารณาคัดเลือกเทคนิคที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์พิจารณาคัดเลือกเทคนิคโดยตัวชี้วัดทางสถิติ ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกใช้เทคนิค IDW ในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของการสีกร่อนโบราณสถาน

**ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์พิจารณาคัดเลือกเทคนิคโดยตัวชี้วัดทางสถิติ**

สารมลพิษทางอากาศ	เทคนิค Interpolation	FB	MG	NMSE	VG	R	FAC2
SO <sub>2</sub>	IDW	-0.05*	0.96*	0.01*	1.01*	0.14	1.05*
	Spline	-0.11	1.39	0.49	5.31	0.00	1.11
	Kriging (Ordinary)	-0.16	0.87	0.06	1.04	0.15	1.17
	Kriging (Universal)	-0.38	0.80	0.27	1.10	0.16*	1.30
NO <sub>2</sub>	IDW	0.05	1.05	0.00*	1.00*	0.07	0.95
	Spline	0.30	-	1.06	-	-0.03	0.74
	Kriging (Ordinary)	-0.02*	0.99*	0.01	1.01	0.20*	1.02*
	Kriging (Universal)	-0.03	0.98	0.02	1.02	0.07	1.03
O <sub>3</sub>	IDW	-0.05*	0.95*	0.01*	1.01*	0.06	1.05*
	Spline	-0.20	-	0.63	-	0.03	1.22
	Kriging (Ordinary)	-0.11	0.90	0.02	1.02	0.07	1.11
	Kriging (Universal)	-0.34	0.73	0.17	1.17	0.09*	1.41
PM <sub>10</sub>	IDW	0.10*	1.21	0.08*	1.43	0.08*	0.91*
	Spline	-0.23	0.93*	0.36	1.50	0.02	1.26
	Kriging (Ordinary)	0.15	1.25	0.09	1.32*	0.00	0.86
	Kriging (Universal)	0.18	1.37	0.13	1.73	0.03	0.83

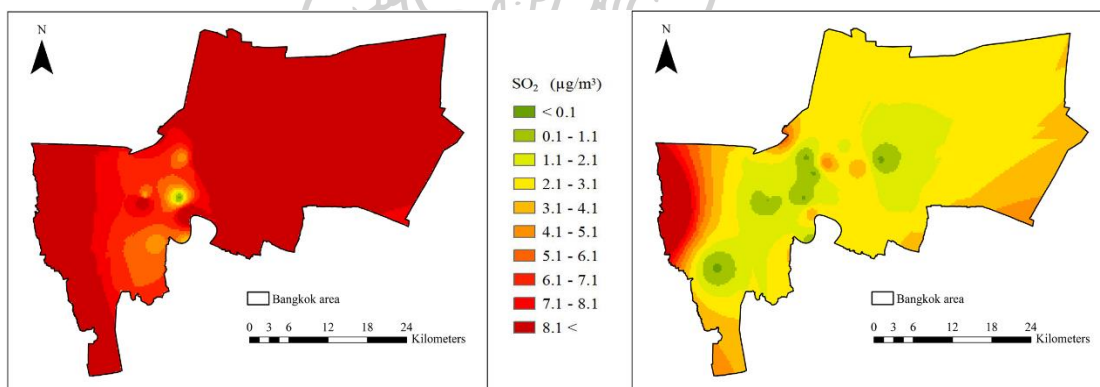
หมายเหตุ : \* ค่าที่ให้ผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น และ - แทนค่าทางสถิติที่ขาดหายไป

#### 4.2 ผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศเชิงพื้นที่

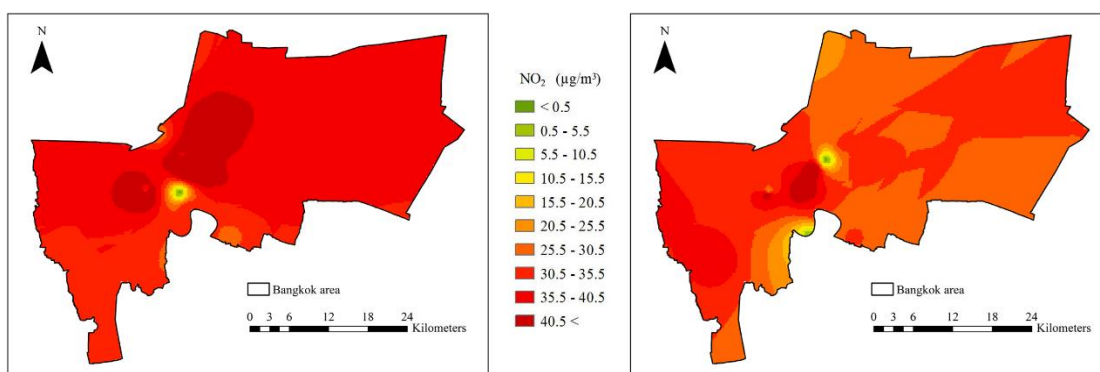
แผนที่ความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศในพื้นที่กรุงเทพมหานครในปี พ.ศ. 2553 และปี พ.ศ. 2562 แสดงได้ดังภาพที่ 12-15 พบว่า เมื่อเทียบค่าความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศระหว่างปี พ.ศ. 2553 และปี พ.ศ. 2562 ค่าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ และ โอโซน ในพื้นที่ในกรุงเทพมหานครลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปรับปรุงเทคโนโลยียานยนต์ และการพัฒนาเรื่องคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Holnicki, Nahorski, & Katuszko, 2021) โดยการกระจายของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศมีความคล้ายคลึงกันกับการกระจายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแหล่งที่มาของมลพิษทั้งสอง คือ การจราจร แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ซัลเฟอร์ออกไซด์ส่วนใหญ่จะถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ของสารประกอบที่มีส่วนผสมของกำมะถันในเชื้อเพลิงฟอสซิล (ในกรณีนี้คือการเผาไหม้น้ำมันดีเซลที่มีคุณภาพต่ำ) ในขณะที่ไนโตรเจนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกประเภท นอกจากนี้ซัลเฟอร์ออกไซด์ของ

ไนโตรเจนยังมีผลต่อการเกิดก๊าซโอโซนซึ่งเป็นสารมลพิษทุติยภูมิซึ่งเกิดจากออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen: NOx) และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) ดังนั้น ถ้าออกไซด์ของไนโตรเจนต่ำลงก็จะเกิดโอโซนลดลงตามไปด้วย (Lee et al., 2021; ศักดิ์สิทธิ์ ผลภิญโญ & พรพรรณ สกุลค, 2564) ซึ่งการลดลงของความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ และ โอโซน ในช่วงสองปีนี้เป็นไปในทางเดียวกับข้อมูลคุณภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร (กรมควบคุมมลพิษ & กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2563)

ในส่วนของผู้ลงขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนที่เพิ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2562 อาจเป็นผลมาจากการขยายตัวของชุมชนเมือง ที่มีการก่อสร้างคอนโดมิเนียม และรถไฟฟ้าในพื้นที่กรุงเทพมหานครและพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Sanecharoen, Nakhapakorn, Mutchimwong, Jirakajohnkool, and Onchang (2019) ผลการศึกษาจากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ในช่วงปี พ.ศ. 2551-2557 บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในกรุงเทพมหานคร ที่พบว่าพื้นที่ธรรมชาติที่มีอยู่ถูกแทนที่ด้วยพื้นที่ชุมชนเมือง

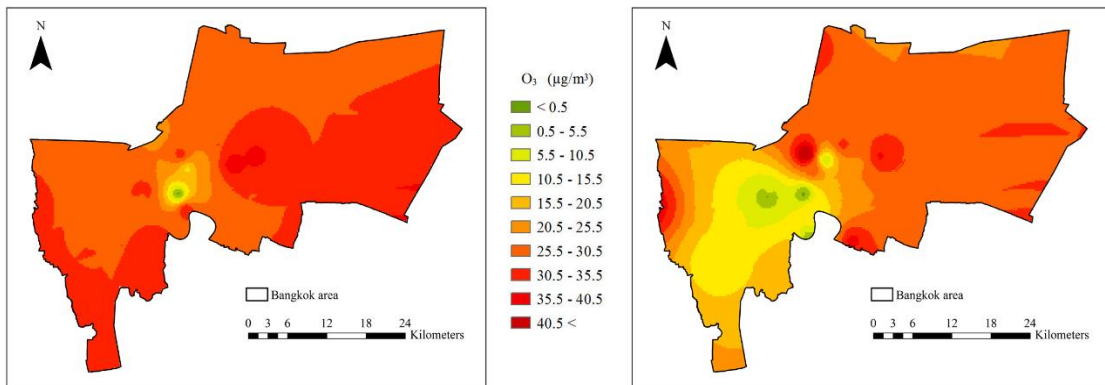


ภาพที่ 12 แผนที่ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)

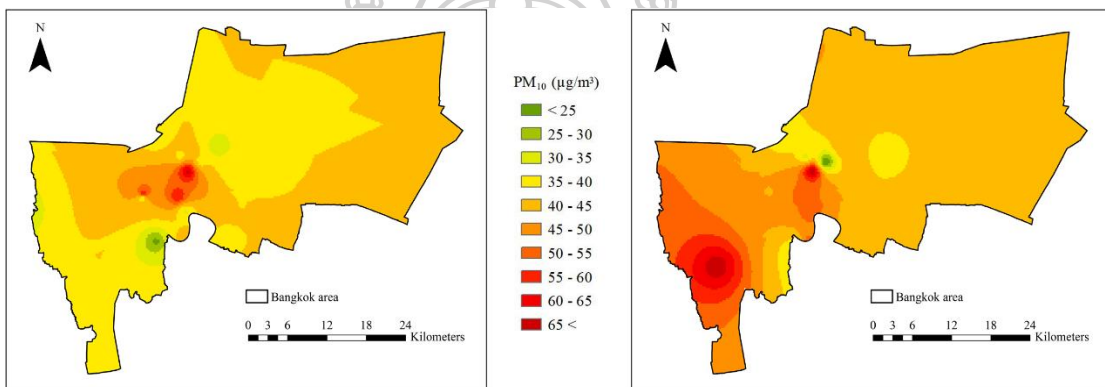


ภาพที่ 13 แผนที่ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ในปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)





ภาพที่ 14 แผนที่ความเข้มข้นของโอโซนในปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)



ภาพที่ 15 แผนที่ความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนในปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)

#### 4.3 ผลการประมาณค่าระดับการสึกกร่อนเชิงพื้นที่ และประเมินความเสี่ยงต่ออัตราการสึกกร่อน

ผลการประมาณค่าการสึกกร่อนกรณีของวัสดุทองแดง หินปูนพอร์ตแลนด์ เหล็กกล้า คาร์บอน สังกะสี และสัมฤทธิ์หล่อในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นในปี พ.ศ. 2553 แสดงดังภาพที่ 16-20 (ซ้าย) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าระดับการสึกกร่อนของวัสดุในพื้นที่กรุงเทพมหานครส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ที่มีระดับการสึกกร่อนไม่เกินเกณฑ์อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ ยกเว้นกรณีสังกะสี และสัมฤทธิ์หล่อที่มีค่าการสึกกร่อนสูงกว่าอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ในพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานคร ในส่วนของผลการประมาณค่าระดับการสึกกร่อนที่ประเมินได้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 12



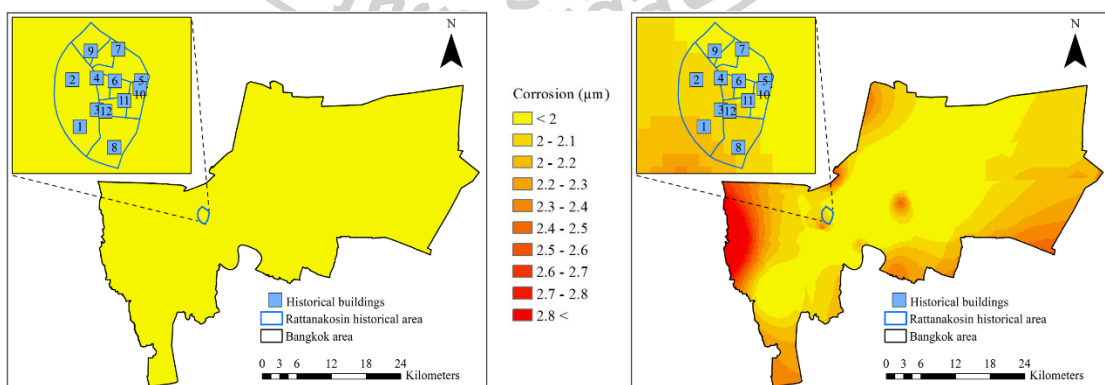
ตารางที่ 10 ผลการประเมินค่าระดับการสึกกร่อนพื้นที่กรุงเทพมหานคร

วัสดุ	ปี พ.ศ.	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เกณฑ์การสึกกร่อนที่ยอมรับได้
ทองแดง	2553	0.5	1.0	0.6	0.03	
	2562	1.6	3.9	2.1	0.3	0.8
	2571	3.3	10.7	4.4	0.8	
หินปูนพอร์ตแลนด์	2553	5.8	9.7	7.4	0.3	
	2562	10.4	58.4	29.8	4.7	8.0
	2571	6.8	220.9	67.3	20.1	
เหล็กกล้าคาร์บอน	2553	10.3	21.8	13.7	1.5	
	2562	0	21.3	12.8	2.3	20.0
	2571	23.1	136.3	54.8	12.5	
สังกะสี	2553	0.6	2.0	1.3	0.1	
	2562	0.03	14.4	6.2	1.3	1.1
	2571	5.4	76.9	15.1	7.5	
สัมฤทธิ์หล่อ	2553	0.6	1.2	0.8	0.07	
	2562	0.02	6.5	4.2	0.6	0.6
	2571	0.81	28.4	10.3	3.7	

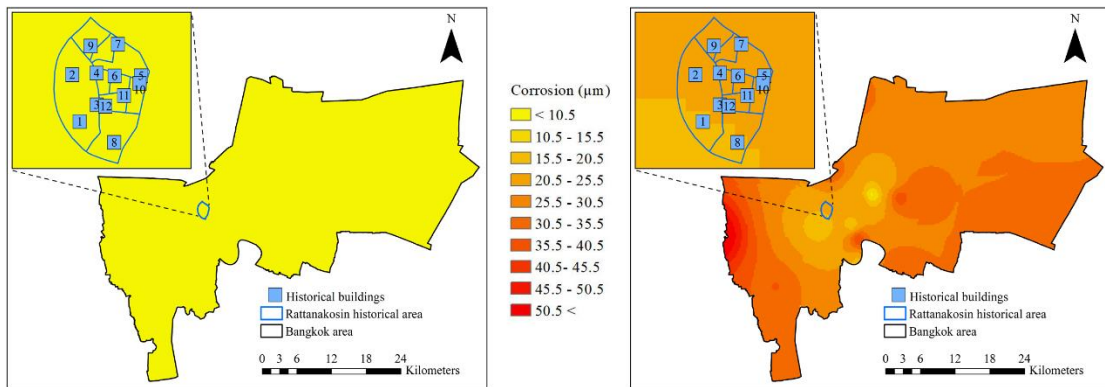
จากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่าในปี พ.ศ. 2553 ระดับการสึกกร่อนของทองแดง หินปูนพอร์ตแลนด์ และเหล็กกล้าคาร์บอนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.6 7.4 และ 13.7 ไมโครเมตร ตามลำดับ โบราณสถานตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีค่าการสึกกร่อนต่ำกว่าอัตราสึกกร่อนที่ยอมรับได้ (0.8 8.0 และ 0.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ) ในส่วนของค่าการสึกกร่อนกรณีของวัสดุสังกะสี และสัมฤทธิ์หล่อ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.2 และ 0.8 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าการสึกกร่อนสูงกว่าค่าการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ (1.1 และ 0.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษางานวิจัยของ Ferhat (2013) ที่ทำการศึกษาค่าการสึกกร่อนของโบราณสถานของเมืองอิสตันบูล ประเทศตุรกี กรณีวัสดุทองแดง หินปูนพอร์ตแลนด์ เหล็กกล้าคาร์บอน และสัมฤทธิ์หล่อ ในปี พ.ศ. 2553 พบว่า การสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.1 5.2 37.3 และ 1.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ การสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานทุกชนิดของเมืองอิสตันบูล มีค่าสูงกว่าผลการประเมินค่าการสึกกร่อนของกรุงเทพมหานคร ยกเว้นกรณีวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์ มีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความเข้มข้นของสารมลพิษทั้งหมด (ยกเว้นไอโซน) และความชื้นสัมพัทธ์ในอิสตันบูลสูงกว่าในกรุงเทพมหานคร

ในขณะที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำฝนต่ำกว่า อนึ่งในกรณีของอิสตันบูล ไม่ได้แสดงปริมาณน้ำฝน ดังนั้นตัวแปรนี้จึงไม่ได้นำมาพิจารณาในการอภิปรายผลนี้

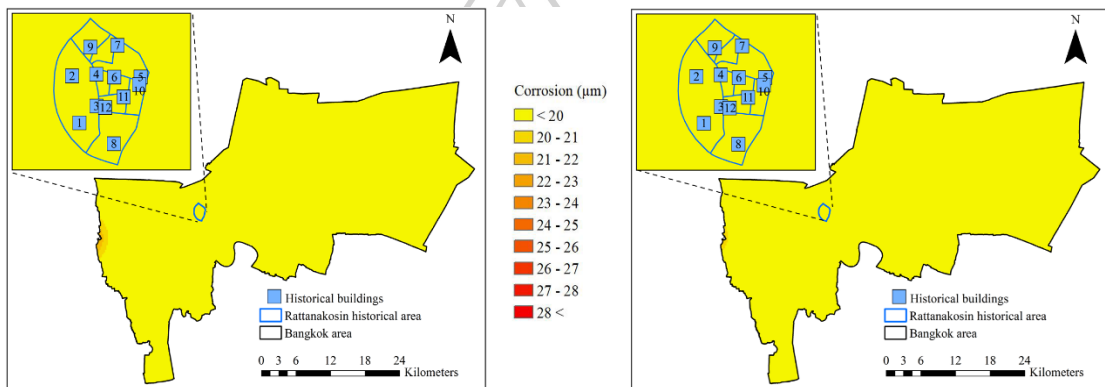
เมื่อพิจารณาระดับการสึกกร่อนในปี พ.ศ. 2562 ที่แสดงดังภาพที่ 16-20 (ขวา) พบว่าระดับการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ที่มีระดับการสึกกร่อนสูงกว่าอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ทุกชนิด ยกเว้นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (12.8 ไมโครเมตร) (ตารางที่ 10) ผลการประมาณค่าการสึกกร่อนกรณีวัสดุทองแดง หินปูนพอร์ตแลนด์ สังกะสี และ สัมฤทธิ์หล่อในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ระดับการสึกกร่อนจากฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.1 29.8 6.2 และ 4.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ สูงกว่าอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าโบราณสถานที่กำลังสร้างด้วยวัสดุเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนอยู่ในระดับสูง ซึ่งโบราณสถานในพื้นที่กรุงเทพมหานครที่มีขอบเขตติดกับจังหวัดสมุทรสาครมีความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนสูงที่สุด (เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 16-20 (ขวา)) เป็นผลมาจากจังหวัดสมุทรสาครจัดเป็นเมืองที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วของกิจกรรมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งในประเทศไทย ประเภทอุตสาหกรรมที่มีมาก ได้แก่ อุตสาหกรรมยางและพลาสติก อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์โลหะ อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอื่น ๆ ตามลำดับ รวมถึงการจราจรที่หนาแน่นจากการขยายตัวของเมืองที่เกี่ยวข้องจากอุตสาหกรรมเป็นเหตุให้บริเวณนี้มีการระบายมลพิษทางอากาศค่อนข้างสูงกว่าบริเวณอื่น นอกจากนี้ระยะเวลาการสัมผัส ก็มีบทบาทสำคัญที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนดังปรากฏในฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ (ตารางที่ 3-4) ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำฝน ก็มีส่วนทำให้เกิดการสึกกร่อนเช่นกัน ผลการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นเร่งด่วนในการลดมลพิษทางอากาศพร้อมกับมาตรการป้องกันการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานทั้งในสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคต



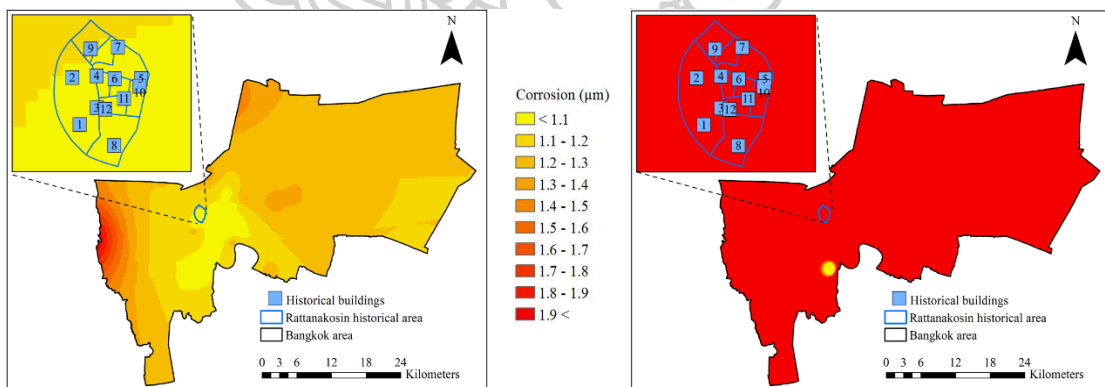
ภาพที่ 16 แผนที่การสึกกร่อนของวัสดุทองแดง ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)



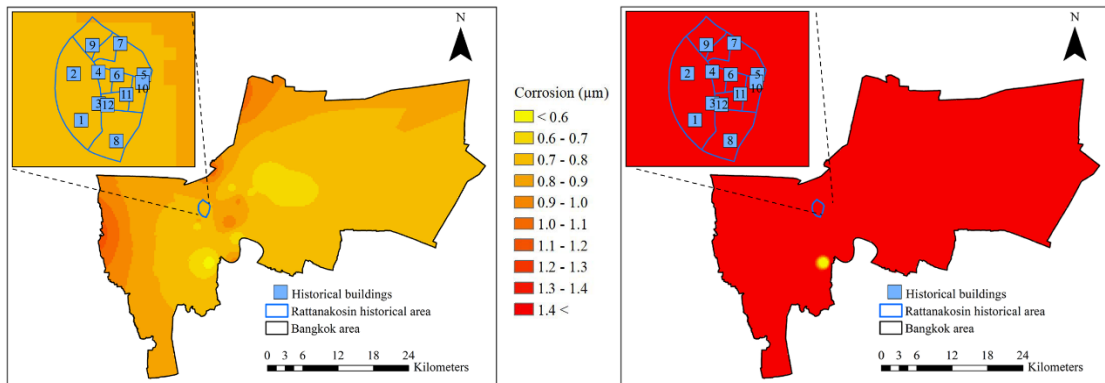
ภาพที่ 17 แผนที่การสึกกร่อนของวัสดุหินปูนพอร์ตแลนด์ ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)



ภาพที่ 18 แผนที่การสึกกร่อนของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)



ภาพที่ 19 แผนที่การสึกกร่อนของวัสดุสังกะสี ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)

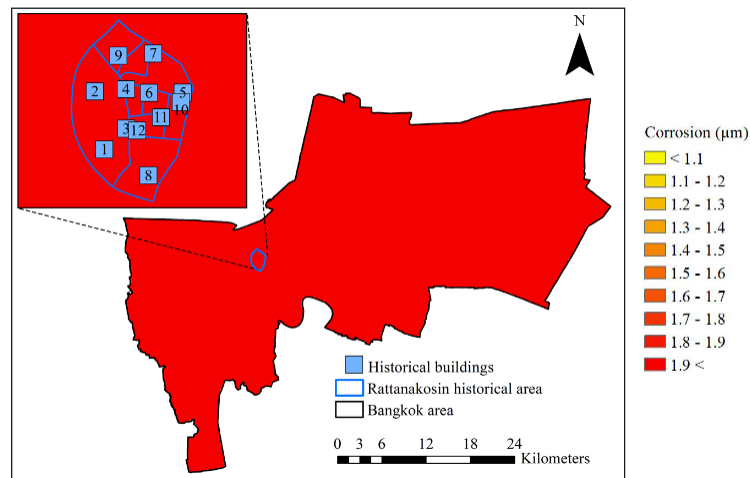


ภาพที่ 20 แผนที่การสึกกร่อนของวัสดุสัมฤทธิ์หล่อ ปี พ.ศ. 2553 (ซ้าย) และ พ.ศ. 2562 (ขวา)

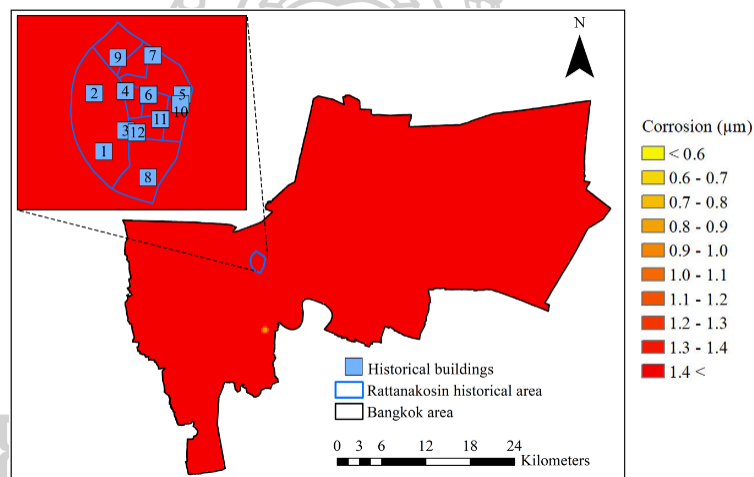
#### 4.4 สถานการณ์ในอนาคต

ในการวิเคราะห์สถานการณ์การสึกกร่อนของวัสดุในอนาคต ได้วิเคราะห์การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของมลพิษทางอากาศ และสถานะทางอุตุนิยมวิทยา (ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำฝน) ในปี พ.ศ. 2571 ด้วยเทคนิค Forecast ในไมโครซอฟต์เอกซ์เซล (เวอร์ชัน 16) โดยใช้ข้อมูลในช่วง 10 ปี (พ.ศ. 2553-2562) ผลที่ได้ มีดังนี้ มลพิษทางอากาศ (ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 8 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไนโตรเจนไดออกไซด์ 29 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โอโซน 29 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน 44 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ กรดไนตริก 1.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และพารามิเตอร์อุตุนิยมวิทยา (อุณหภูมิ 27.2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70.9 ปริมาณน้ำฝน 658.1 มิลลิเมตร และความเข้มข้นไฮโดรเจนไอออนในน้ำฝน 3.04 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อนำมาแทนในฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 21-25 ซึ่งพบว่า มีระดับการสึกกร่อนของวัสดุสูงกว่าปี พ.ศ. 2553 และ พ.ศ. 2562 (ภาพที่ 16-20) และสูงกว่าอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับ (ตารางที่ 10) ได้อีกด้วย แสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนของโบราณสถานในกรุงเทพมหานครอยู่ในระดับสูง อนึ่งในกรณีทองแดงและหินปูนพอร์ตแลนด์ มีพื้นที่บางส่วนที่มีความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนต่ำกว่าพื้นที่ส่วนใหญ่





ภาพที่ 24 แผนที่การสึกกร่อนของสังกะสี ปี พ.ศ. 2571



ภาพที่ 25 แผนที่การสึกกร่อนของสั้มฤทธิ์หล่อปี พ.ศ. 2571

#### 4.5 การสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน

เมื่อวิเคราะห์การสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานที่ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน (ผลแสดงดังตารางที่ 11) เปรียบเทียบระหว่างปี พ.ศ. 2562 และ พ.ศ. 2571 พบว่าการสึกกร่อนของวัสดุทุกชนิดเพิ่มสูงขึ้น และสูงกว่าอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้

ในปี พ.ศ. 2562 ในกรณีของทองแดง โบราณสถานที่มีความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนสูงสุด คือ โบราณสถานหมายเลข 1 (2.1-2.2 ไมโครเมตร) หินปูนพอร์ตแลนด์ระดับการสึกกร่อนสูงสุดอยู่ในช่วง 20.5-25.5 ไมโครเมตร เหล็กกล้าคาร์บอน โบราณสถานทั้ง 12 แห่งมีระดับการสึกกร่อนอยู่ในเกณฑ์การสึกกร่อนที่ยอมรับได้ ซึ่งต่างจากกรณีของสังกะสี และสั้มฤทธิ์หล่อที่โบราณสถานทั้ง 12 แห่งมีระดับการสึกกร่อนสูงกว่าเกณฑ์การสึกกร่อนที่ยอมรับได้



ส่วนในปี พ.ศ. 2571 กรณีของทองแดงโบราณสถานหลายแหล่งในพื้นที่ที่มีระดับการสึกกร่อนเพิ่มสูงขึ้น (โบราณสถานหมายเลข 2-7 และ 9-12) โดยมีระดับการสึกกร่อนอยู่ในช่วง 3.5-4.0 ไมโครเมตร กรณีของหินปูนพอร์ตแลนด์ ระดับการสึกกร่อนสูงเกินกว่า 50.5 ไมโครเมตร และกรณีของเหล็กกล้าคาร์บอน สังกะสี และสัมฤทธิ์หล่อ โบราณสถานทั้ง 12 แห่งในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นในมีระดับการสึกกร่อนสูงกว่า 28 1.9 1.4 ไมโครเมตร ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำในการประมาณค่าความเสี่ยงการสึกกร่อนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การวางตัวของอาคาร (มุมและทิศทาง) สภาพการรับสัมผัสในปัจจุบัน กล่าวคือ เมื่อตัวอาคารที่มีการก่อสร้างเป็นเวลานานอาจพบเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่น บริเวณโดยรอบมีการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม การขยายตัวของชุมชน หรือการเพิ่มพื้นที่สีเขียว เป็นต้น เป็นเหตุให้การรับสัมผัสมลพิษทางอากาศของอาคารเปลี่ยนไปด้วย องค์ประกอบของวัสดุ คุณสมบัติโครงสร้างของโบราณสถานที่แตกต่างกัน และความถูกต้องของฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุ (Onchang & Hawker, 2019) ภายใต้อสภาพบรรยากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพิจารณาอิทธิพลจากปัจจัยเหล่านี้

#### ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความเสี่ยงการสึกกร่อนของโบราณสถานในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน

ที่	ชื่อโบราณสถาน	วัสดุโบราณสถาน	ระดับการสึกกร่อน		
			พ.ศ. 2553	พ.ศ. 2562	พ.ศ. 2571
1	วัดพระเชตุพนวิมลมังคลาราม	ทองแดง	0.6-0.7	2.1-2.2*	<3.5*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	15.5-20.5*	35.5-45.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	<20	28<*	28<*
		สังกะสี	1.1-1.2	1.3-1.4*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
2	วัดมหาธาตุยุวราชรังสฤษฎิ์ราชวรมหาวิหาร	ทองแดง	0.6-0.7	2.0-2.1*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	45.5-50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	<20	28<*	28<*
		สังกะสี	1.3-1.4	1.4-1.5*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความเสี่ยงการสึกกร่อนของโบราณสถานในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน (ต่อ)

ที่	ชื่อโบราณสถาน	วัสดุโบราณสถาน	ระดับการสึกกร่อน		
			พ.ศ. 2553	พ.ศ. 2562	พ.ศ. 2571
3	วัดราชประดิษฐสถิตมหาสีมาราม	ทองแดง	0.6-0.7	2.0-2.1*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	40.5-45.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	<20	28<*	28<*
		สังกะสี	1.3-1.4*	1.3-1.4*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
4	วัดบูรณศิริมาตยาราม	ทองแดง	0.6-0.7	2.0-2.1*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	45.5-50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	20-21*	28<*	28<*
		สังกะสี	1.3-1.4*	1.4-1.5*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
5	วัดราชนันทาราม	ทองแดง	0.6-0.7	<2.0*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	>50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	20-21*	28<*	28<*
		สังกะสี	1.3-1.4*	1.4-1.5*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
6	วัดมหรณพาราม	ทองแดง	0.6-0.7	<2.0*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	45.5-50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	20-21*	28<*	28<*
		สังกะสี	1.3-1.4*	1.4-1.5*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
7	วัดบวรนิเวศวิหาร	ทองแดง	0.6-0.7	<2.0*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	>50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	22-23*	28<*	28<*
		สังกะสี	1.4-1.5*	1.5-1.6*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความเสี่ยงการสึกกร่อนของโบราณสถานในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน (ต่อ)

ที่	ชื่อโบราณสถาน	วัสดุโบราณสถาน	ระดับการสึกกร่อน		
			พ.ศ. 2553	พ.ศ. 2562	พ.ศ. 2571
8	วัดราชบูรณราชวรวิหาร	ทองแดง	0.6-0.7	2.0-2.1*	<3.5*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	15.5-20.5*	40.5-45.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	<20	28<*	28<*
		สังกะสี	1.1-1.2*	1.3-1.4*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
9	วัดชนะสงคราม	ทองแดง	0.6-0.7	<2.0*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	45.5-50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	21-22*	28<*	28<*
		สังกะสี	1.4-1.5*	1.5-1.6*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
10	วัดเทพธิดาราม	ทองแดง	0.6-0.7	<2.0*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	>50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	20-21*	28<*	28<*
		สังกะสี	1.3-1.4*	1.4-1.5*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
11	วัดสุทัศน์เทพวราราม	ทองแดง	0.6-0.7	<2.0*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	45.5-50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	<20	28<*	28<*
		สังกะสี	1.3-1.4*	1.4-1.5*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*
12	วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม	ทองแดง	0.6-0.7	2.0-2.1*	3.5-4.0*
		หินปูนพอร์ตแลนด์	7.0-7.4	20.5-25.5*	45.5-50.5*
		เหล็กกล้าคาร์บอน	<20	28<*	28<*
		สังกะสี	1.3-1.4*	1.3-1.4*	1.9<*
		สัมฤทธิ์หล่อ	<0.6	1.4<*	1.4<*

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความเสี่ยงการสึกกร่อนของโบราณสถานในพื้นที่กรุงรัตนโกสินทร์ชั้นใน (ต่อ)

	อัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ ( $\mu\text{m}$ ) <sup>1</sup>
ทองแดง	0.8
หินปูนพอร์ตแลนด์	8.0
เหล็กกล้าคาร์บอน	20
สังกะสี	1.1
สัมฤทธิ์หล่อ	0.6

หมายเหตุ: \* คือ ค่าการสึกกร่อนที่สูงกว่าอัตราการสึกกร่อนที่ยอมรับได้ของวัสดุแต่ละชนิด และ

<sup>1</sup> อ้างถึงค่าในตารางที่ 6



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

การประยุกต์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศและระดับการสีกร่อนของกรุงเทพมหานคร และการสีกร่อนโบราณสถานในพื้นที่กรุงเทพมหานครโกสินทร์ชั้นใน เริ่มจากการวิเคราะห์ความเหมาะสมของเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ พบว่าเทคนิค Inverse Distance Weighting (IDW) มีความเหมาะสมที่สุด จากนั้นได้ทำการประมาณค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศในปี พ.ศ. 2553 และ พ.ศ. 2562 ความเข้มข้นของมลพิษทั้งหมดในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ยกเว้นฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ลดลงจากปี พ.ศ. 2553 เมื่อนำข้อมูลมลพิษทางอากาศและอุตุนิยมวิทยาเข้ามาคำนวณในฟังก์ชันการสีกร่อนของวัสดุและประมาณค่าระดับการสีกร่อนเชิงพื้นที่ พร้อมทั้งประเมินความเสี่ยงต่ออัตราการสีกร่อน พบว่า ในปี พ.ศ. 2553 ระดับการสีกร่อนของวัสดุในพื้นที่กรุงเทพมหานครส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ที่มีระดับการสีกร่อนต่ำกว่าเกณฑ์อัตราการสีกร่อนที่ยอมรับได้ ยกเว้นกรณีสังกะสี และสัมฤทธิ์หล่อ ที่มีค่าการสีกร่อนสูงกว่าอัตราการสีกร่อนที่ยอมรับได้ในพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานคร ในปี พ.ศ. 2562 ระดับการสีกร่อนของวัสดุส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ที่มีระดับการสีกร่อนสูงกว่าอัตราการสีกร่อนที่ยอมรับได้ทุกชนิด ยกเว้นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน และเมื่อวิเคราะห์สถานการณ์การสีกร่อนของวัสดุในอนาคต ปี พ.ศ. 2571 พบว่า มีระดับการสีกร่อนของวัสดุสูงกว่าปี พ.ศ. 2553 และ พ.ศ. 2562 และสูงกว่าอัตราการสีกร่อนที่ยอมรับ แสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงต่อการสีกร่อนของโบราณสถานในกรุงเทพมหานครอยู่ในระดับสูง และพบว่าการสีกร่อนของวัสดุทุกชนิดในพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นในเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการสีกร่อนที่ยอมรับได้เช่นกัน ซึ่งให้เห็นว่ามลพิษทางอากาศเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ และความทนทานของโครงสร้างวัสดุ ซึ่งทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของโบราณสถานและการสีกร่อนของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโบราณสถานส่วนใหญ่มีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่กลางแจ้ง เป็นเหตุให้เกิดความเสื่อมโทรมจากการได้รับความเสี่ยงต่อสภาพแวดล้อม มลภาวะทางอากาศที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของมลพิษทางอากาศส่วนใหญ่มีมุมมองเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพ แต่การศึกษาผลกระทบต่อการเสื่อมโทรมของโบราณสถานยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด ทั้งนี้การประมาณค่าเชิงพื้นที่มลพิษทางอากาศและการประเมินระดับการสีกร่อนของโบราณสถานด้วยฟังก์ชันการสีกร่อนของวัสดุสามารถนำข้อมูลที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการวางแผนปฏิบัติการเชิงกลยุทธ์ในการลดระดับมลภาวะ

ในอากาศและหาแนวทางการแก้ไขปัญหาการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่สืบต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

จากผลการพิจารณาคัดเลือกเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ พบว่า ค่าพิจารณาทางสถิติของเทคนิค IDW และ Kriging Ordinary ต่างกันเพียงเล็กน้อย หากมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้ ขอเสนอแนะให้ใช้ทั้ง 2 เทคนิคนี้ประมาณค่าเชิงพื้นที่การสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถาน เพื่อเปรียบเทียบความแน่ชัดของผลการศึกษาเพิ่มเติม และหากมีการวิเคราะห์ระดับการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถาน โดยแบ่งข้อมูลเป็นช่วงเวลาตามฤดูกาล อาจแสดงให้เห็นถึงระดับการสึกกร่อนของวัสดุโบราณสถานในแต่ละช่วงเวลาที่ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยข้อมูลคุณภาพอากาศและอุตุนิยมวิทยาบางช่วงเวลาอาจมีการขาดหาย ควรมีการนำเอาเทคนิคทางสถิติหรือเทคนิคทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการซ่อมแซมข้อมูล เพื่อทดแทนข้อมูลที่ขาดหายไป อีกทั้งหากมีการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการเก็บข้อมูลภาคสนามในส่วนของข้อมูลสภาพอากาศและข้อมูลอุตุนิยมวิทยา รวมถึงข้อมูลโบราณสถาน (ได้แก่ วัสดุที่ใช้ก่อสร้างโบราณสถาน และอายุโบราณสถาน) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ รวมถึงควรมีการศึกษาและพัฒนาฟังก์ชันการสึกกร่อนของวัสดุให้มีความเหมาะสมกับวัสดุก่อสร้างชนิดต่าง ๆ และสภาพสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย





## รายการอ้างอิง

- Castillo-Miranda, J. O., Rodríguez-Gómez, F. J., Genescá-Llongueras, J., Ruiz-Suárez, L. G., & García-Reynoso, J. A. (2021). Estimation and mapping of the contribution of nitric acid to atmospheric corrosion of zinc. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 7(4), 523-542. doi:10.22034/gjesm.2021.04.03
- Chang, K.-t. (2019). *Introduction to Geographic Information Systems* (9th ed. ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Dale, M. R. T., & Fortin, M. J. (2014). *Spatial analysis : a guide for ecologists*. England: Cambridge University Press.
- de la Fuentea, D., Vegaa, J. M., Viejob, F., Díaza, I., & Morcillo, M. (2013). Mapping air pollution effects on atmospheric degradation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 14, 138-145. doi:10.1016/j.culher.2012.05.002
- Dixon, B., & Uddameri, V. (2016). *Gis and geocomputation for water resourcne science and engineering/ Barnnali Dixon and Venkatesh Uddameri*. UK: John Wily and Sons Ltd.
- European Union. (2005). *Model for Multi-Pollutant Impact and Assessment of Threshold Levels for Cultural Heritage: EU 5FP RTD Project*. Retrieved from <https://www.ri.se/sites/default/files/2021-04/ICP-MULTI-ASSESS-Publishable-final-report.pdf>
- Ferhat, K. (2013). Mapping the corrosion impact of air pollution on the historical peninsula of Istanbul. *Journal of Cultural Heritage*, 14(2), 129-137. doi:10.1016/j.culher.2012.04.011
- Holnicki, P., Nahorski, Z., & Katuszko, A. (2021). Impact of Vehicle Fleet Modernization on the Traffic-Originated Air Pollution in an Urban Area—A Case Study. *Atmosphere*, 12, 1581. doi:10.3390/atmos12121581
- Jumaah, H. J., Ameen, M. H., Kalantar, B., Rizeei, H. M., & Jumaah, S. J. (2019). Air quality index prediction using IDW geostatistical technique and OLS-based GIS technique in Kuala Lumpur, Malaysia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 2185–2199. doi:10.1080/19475705.2019.1683084

- Kucera, V. (Ed.) (2014). *IV. MAPPING OF EFFECTS ON MATERIALS*. Berlin: Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt).
- Lan, T. T. N., Nishimura, R., Tsujino, Y., Satoh, Y., Thoa, N. T. P., Yokoi, M., & Maeda, Y. (2005). The effects of air pollution and climatic factors on atmospheric corrosion of marble under field exposure. *Corrosion Science*, *47*, 1023–1038. doi:10.1016/j.corsci.2004.06.013
- Lee, H.-J., Chang, L.-S., Jaffe, D. A., Abad, G. G., Bak, J., Liu, X., . . . Kim, C.-H. (2021). Ozone Continues to Increase in East Asia Despite Decreasing NO<sub>2</sub>: Causes and Abatements. *remote sensing*, *13*, 2177. doi:10.3390/rs13112177
- Microsoft. (2021). FORECAST.ETS function. Retrieved from <https://support.microsoft.com/en-us/office/forecast-ets-function-15389b8b-677e-4fbd-bd95-21d464333f41>
- Onchang, R., & Hawker, D. W. (2019). A Computational Program for Estimating Atmospheric Corrosion of Monuments. *Environment and Natural Resources*, *17*(3), 19-28. doi:10.32526/enrj.17.3.2019.19
- Pharasit, M., & Chaiyakarm, T. (2020). Geoinformatics Application on Air Quality Assessment: A Case Study in Bangkok. *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, *28*(5), 743-758. doi:10.14456/tstj.2020.61
- Reiss, D., Rihm, B., Thöni, C., & Faller, M. (2004). Mapping stock at risk and release of zinc and copper in switzerland – dose response functions for runoff rates derived from corrosion rate data. *Water, Air, and Soil Pollution*, *159*, 101-113. doi:10.1023/B:WATE.0000049163.18416.ec
- Sanecharoen, W., Nakhapakorn, K., Mutchimwong, A., Jirakajohnkool, S., & Onchang, R. (2019). Assessment of Urban Heat Island Patterns in Bangkok Metropolitan Area Using Time-Series of LANDSAT Thermal Infrared Data. *Environment and Natural Resources Journal*, *17*(4), 87-102. doi:10.32526/enrj.17.4.2019.34
- Simpson, G., & Wu, Y. H. (2014). Accuracy and Effort of Interpolation and Sampling: Can GIS Help Lower Field Costs? *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *3*, 1317-1333. doi:10.3390/ijgi3041317
- Spranger, T., Gregor, H.-D., & Lorenz, U. (2004). Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks

- and Trends. In. Berlin: Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt).
- Srivastava, P. K., Pandey, P. C., Petropoulos, G. P., Kourgialas, N. N., Pandey, V., & Singh, U. (2019). GIS and Remote Sensing Aided Information for Soil Moisture Estimation: A Comparative Study of Interpolation Techniques. *Resources*, 8(2), 70. doi:10.3390/resources8020070
- Syed, S. (2006). Atmospheric corrosion of materials. *Emirates Journal for Engineering Research*, 11(1), 1-24.
- Tidblad, J., Kucera, V., Ferm, M., Kreislova, K., Brüggerhoff, S., Doytchinov, S., . . . Karmanova, N. (2012). Effects of Air Pollution on Materials and Cultural Heritage: ICP Materials Celebrates 25 Years of Research. *International Journal of Corrosion*, 2012, 1-16. doi:10.1155/2012/496321
- Tidblad, J., Kucera, V., Mikhailov, A. A., Henriksen, J., Kreislova, K., Yates, T., . . . Schreiner, M. (2001). UN ECE ICP materials. Dose-response functions on dry and wet acid deposition effects after 8 years of exposure. *Water, Air, and Soil Pollution*, 130, 1457-1462.
- Tidblad, J., Kucera, V., Samie, F., Das, S. N., Bhamornsut, C., Peng, L. C., . . . Simbi, D. (2007). Exposure Programme on Atmospheric Corrosion Effects of Acidifying Pollutants in Tropical and Subtropical Climates. *Water, air & soil pollution*, 7(1-3), 241-247. doi:10.1007/s11267-006-9078-6
- United Nations Economic Commission for Europe. (2009). *Executive body for the convention on long-range transboundary air pollution*. Retrieved from <https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2009/EB/wge/ece.eb.air.wg.1.2009.16.e.pdf>
- Usman, F., Zakaria, C. M., & Omar, R. C. (2013). *Development of corrosion risk map for Peninsular Malaysia using climatic and air pollution data*. Paper presented at the 4th International Conference on Energy and Environment 2013 (ICEE 2013), Putrajaya, Malaysia.
- Viitanen, H., Toratti, T., Makkonen, L., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Ruokolainen, L., & Räsänen, J. (2010). Towards modelling of decay risk of wooden materials. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68, 303-313. doi:10.1007/s00107-010-0450-x

- Vorapracha, P., Phonprasert, P., Khanaruksombat, S., & Pijarn, N. (2015). A Comparison of Spatial Interpolation Methods for predicting concentrations of Particle Pollution (PM<sub>10</sub>). *International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS)*, 3(4), 302-306.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2560). ยุทธศาสตร์การจัดการมลพิษ 20 ปี และแผนจัดการมลพิษ พ.ศ. 2560 – 2564. Retrieved from <https://www.pcd.go.th/archives/publication/5559>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2562). สารกรดในบรรยากาศ : มลพิษไร้พรมแดน. Retrieved from <https://www.pcd.go.th/publication/4683>
- กรมควบคุมมลพิษ, & กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2563). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2562. Retrieved from <https://www.pcd.go.th/publication/8013>
- พิเชษฐ์ เดชผิว. (2548). เกาะรัตนโกสินทร์พัฒนาการทางสังคมและวัฒนธรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แม่ใจ.
- พิสิฐ เจริญวงศ์. (2535). การอนุรักษ์โบราณสถาน และโบราณวัตถุ. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่ม ๑๖. Retrieved from <https://www.saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=16&chap=3&page=t16-3-infodetail03.html>
- วนิดา จินตศาสตร์. (2551). มลพิษอากาศและการจัดการคุณภาพอากาศ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศักดิ์สิทธิ์ ผลภิญโญ, & พรพรรณ สกุล. (2564). ปริมาณโอโซนและไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่สัมพันธ์กับการจราจรรอบบึงสีฐาน ในเขตมหาวิทยาลัยขอนแก่น. วารสารวิจัยและพัฒนา ระบบสุขภาพ, 14(2), 135-143.
- ศิวพันธ์์ ชูอินทร์. (2556). มลพิษทางอากาศ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา. (2535). พระราชบัญญัติโบราณสถาน โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ (ฉบับที่ ๒) (เล่ม 109 ตอนที่ 38, น. 12). Retrieved from [https://www.m-culture.go.th/mculture\\_th60/article\\_attach/28.pdf](https://www.m-culture.go.th/mculture_th60/article_attach/28.pdf)
- สุเพชร จิรขจรกุล. (2552). เรียนรู้ระบบภูมิสารสนเทศด้วยโปรแกรม ArcGIS Desktop 9.3.1. นนทบุรี: บริษัท เอส.อาร์. พรินติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวณัฐชา แดงประทุม
วัน เดือน ปี เกิด	24 พฤศจิกายน 2539
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	37/4 หมู่ที่ 6 ตำบลหลักสาม อำเภอบ้านแพ้ว จังหวัดสมุทรสาคร 74120 Email address: Nuttacha.24@gmail.com
ผลงานตีพิมพ์	Daengprathum, N., Onchang, R., Nakhapakorn, K., Robert, O., Tipayarom, A., & Johann Sturm, P. (2022). Estimation of Effects of Air Pollution on the Corrosion of Historical Buildings in Bangkok: 10.32526/ennrj/20/202200071. Environment and Natural Resources Journal, 20(5), 505–514. Retrieved from <a href="https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ennrj/article/view/247080">https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ennrj/article/view/247080</a>

