การตกสะสมของกรด... ภัยต่อโบราณสถานในเขตเมือง

อ.ดร.สิรินารี เงินเจริญ*

กระแสเศรษฐกิจแบบเสรีนิยมมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกับการพัฒนาอุตสาหกรรมที่เติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การขยายพื้นที่ธุรกิจและฐานการผลิตกระจายไปตามภูมิภาคต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น เกิดเป็นชุมชนขนาดใหญ่และพัฒนาต่อเนื่องเป็นพื้นที่ระดับกลาง (meso-scale) หรือเมือง การขับเคลื่อนเศรษฐกิจที่สอดคล้องกับอุปสงค์-อุปทานดังกล่าว สร้างทั้งประโยชน์และโทษต่อสังคมเมือง ในแง่ของประโยชน์เห็นได้ชัดเจนจากความเจริญที่เพิ่มขึ้นตามกระแสของการพัฒนา อย่างไรก็ตาม โทษหรือผลกระทบก็ปรากฏผลควบคู่กัน จึงพบปัญหามลพิษหลายประการในเมืองต่าง ๆ อาทิ ปัญหามลพิษทางอากาศ มลพิษทางน้ำ มลพิษทางเสียงและการสั่นสะเทือน ปัญหาขยะและสิ่งปฏิกูล และปัญหาการเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อมศิลปกรรม จากผลกระทบดังกล่าว กลไกการแก้ไขปัญหาและมาตรการการอนุรักษ์ภายใต้ความร่วมมือจากภาคส่วนต่าง ๆ จึงถูกกำหนดขึ้นตามแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน

*มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว

บทนำ

ประเด็นปัญหาทั้งเร่งด่วนและเรื้อรังของเมืองถูกนำเสนอโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เมืองยังเป็นพื้นที่ที่เหมาะแก่การอยู่อาศัย ตามแนวทางเมืองน่าอยู่ (healthy Cities) ขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) อย่างไรก็ตาม แนวทางการจัดการปัญหาในเมืองบางเรื่อง ได้แก่ ปัญหาการเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อมศิลปกรรมในเมืองมักไม่ใช่ประเด็นสำคัญที่ถูกนำมากล่าวถึง หรือเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจจำกัดอยู่ในวงแคบ ทั้งที่ตามสถิติแล้วโบราณสถานส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในชุมชนหรือเมือง (Horemans et al., 2011) ด้วยเหตุนี้จึงพบว่า โบราณสถานในเมืองบางแห่งเสื่อมสภาพจนไม่อาจฟื้นฟูได้อีกแล้ว หลายแห่งได้รับการบูรณะปฏิสังขรณ์แต่เป็นวิธีที่ทำให้สูญเสียความแท้ (authenticity) หรือเอกลักษณ์ดั้งเดิมของพื้นที่ (core identity) ไปโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์ และมีโบราณสถานอีกจำนวนไม่น้อยที่อยู่ในภาวะเสี่ยงจากกิจกรรมของมนุษย์ (Ghedini et al., 2011) ทั้งนี้ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศก็เป็นปัจจัยเสี่ยงดังกล่าว โดยเฉพาะเมื่อมลพิษนั้นสร้างปัญหาการตกสะสมของกรด (acid deposition) ที่มีต่อโบราณสถาน

การตกสะสมของกรด (Acid deposition)

การตกสะสมของกรดเป็นเรื่องที่นักวิทยาศาสตร์ศึกษากันมานาน ดังปรากฏหลักฐานเอกสารเมื่อปี ค.ศ.1852 ว่า Robert Agnus Smith นักเคมีชาวอังกฤษเป็นคนแรกที่รายงานเรื่องนี้ (Fan et al., 2010) แต่ปัญหาการตกสะสมของกรดเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางในราวปี คศ. 1985 เมื่อนิตยสารไทม์ (Time Magazine) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ตีพิมพ์บทความเรื่อง "The dying Forests – What Is Killing All the Trees?" ซึ่งมีเนื้อความกล่าวถึงเหตุการณ์ที่เรียกว่า "Waldsterben" หรือภัยจากฝนกรดที่ทำให้ต้นไม้ในป่าของประเทศเยอรมนีตาย ต่อมาก็มีการวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบจากการตกสะสมของกรดต่อสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เพิ่มขึ้น และได้นิยามโดยสรุปว่า การตกสะสมของกรดนั้น คือ สภาวะที่มีการเผาไหม้ทั้งที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติ และกิจกรรมของมนุษย์แล้วปลดปล่อยก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) หรือออกไซด์ของกำมะถัน (SOx) บางกรณีพบว่า แอมโมเนียก็เป็นสาเหตุด้วย (Hordijk and Kroeze, 1997) โดยก๊าซดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อเนื่องกับสารประกอบในบรรยากาศเปลี่ยนรูปเป็นกรด ดังนี้

$SO_2(g) + H_2O(l) \longrightarrow H_2SO_3(aq)$

$2SO_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 2SO_3(g)$

$SO_3(g) + H_2O(l) \longrightarrow H_2SO_4(aq)$

$2NO_2(g) + H_2O(l) \longrightarrow HNO_2(aq) + HNO_3(aq)$

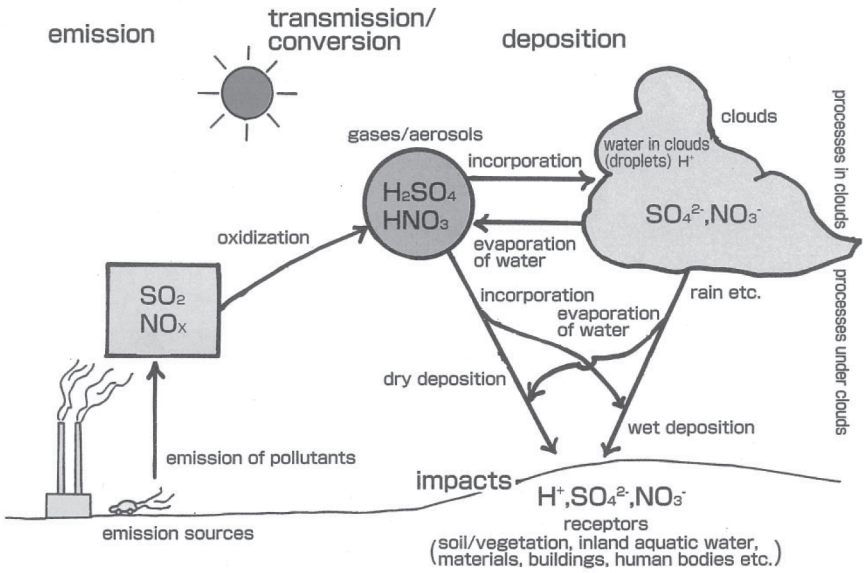
$NH_3(aq) + HNO_3(aq) \longrightarrow NH_4NO_3(aq)$

$NH_3(aq) + H_2SO_4(aq) \longrightarrow NH_4HSO_4(aq)$

กรดที่เกิดขึ้นในบรรยากาศไม่สูญหาย แต่จะตกกลับลงมาสะสมบนสิ่งแวดล้อมบนพื้นโลก การตกกลับดังกล่าวนั้น จำแนกตามสถานะของกรดที่ตกกลับมาสะสมได้ 2 ลักษณะ แสดงได้ดังรูปภาพที่ 1

(1) การตกสะสมแบบแห้ง (Dry deposition) สถานะของกรดที่ตกสะสมเป็นสารกรดแขวนลอยในบรรยากาศมิได้เกิดปฏิกิริยากับน้ำในบรรยากาศ การตกสะสมลักษณะนี้พบได้ทั้งกับสิ่งแวดล้อมทั่วไป สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ พบได้ทั้งสภาพฟ้าโปร่งหรือเมฆมากก็ได้ (สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ, 2555) ซึ่งภายหลังเมื่อสารมลพิษนั้นได้รับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมก็จะเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิววัสดุโบราณสถานโดยตรง การตกสะสมของกรดลักษณะนี้จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โบราณสถานเสื่อมสภาพ (Keuken et al., 1990)

(2) การตกสะสมแบบเปียก (Wet deposition) สถานะของกรดที่ตกสะสมเป็นของเหลว เกิดจากสารกรดแขวนลอยในบรรยากาศเกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือถูกชะล้าง (wash out) ด้วยน้ำในบรรยากาศ แล้วตกลงสู่สิ่งแวดล้อมบนพื้นโลกในรูปของฝน หมอก หิมะ ฯลฯ ที่มีค่าความเป็นกรด ทั้งนี้ พบว่าในเมืองที่มีการเผาไหม้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันและมีอนุภาคหรือเถ้าจากการเผาไหม้นั้น ความชื้นในบรรยากาศเพียง 40–50% ก็ส่งผลให้วัสดุจำพวกหินอ่อนหรือแคลคารีไนต์ (calcarenite) เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงได้ (Primerano et al., 2000)



SO_2:sulfur dioxide, H_2SO_4:sulfuric acid, SO_4^{2-}:sulfuric acid ion, H^+:hydrogen acid ion
NO_x:nitrous oxides, HNO_3:nitric acid, NO_3^-:nitric acid ion

รูปภาพที่ 1 กระบวนการตกสะสมของกรด
ที่มา : JAPAN ENVIRONMENTAL SANITATION CENTER. N.d.

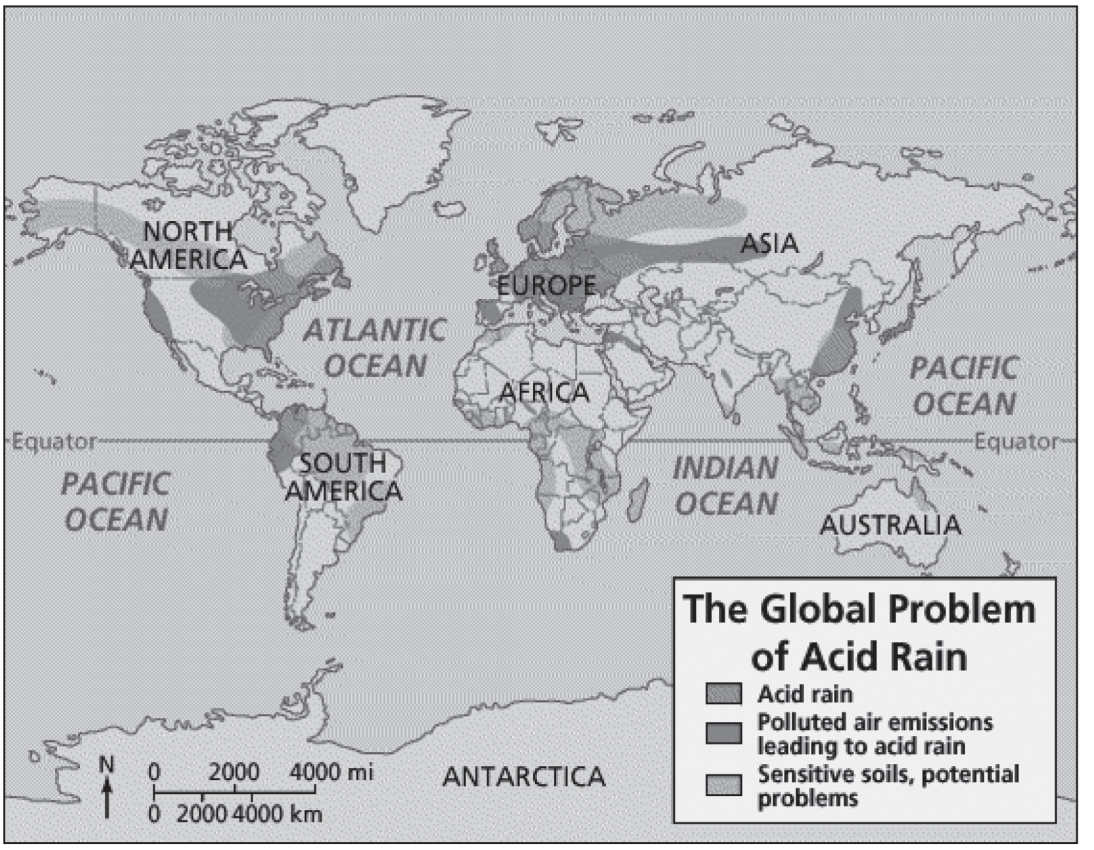
การตกสะสมที่เกิดขึ้นทั้งสองลักษณะข้างต้นจะก่อให้เกิดสารประกอบที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำกว่าปกติ กล่าวคือ หยดน้ำฝนธรรมชาติจะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.6 หากค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 5.6 แสดงว่า น้ำฝนดังกล่าวมีการปนเปื้อนและเริ่มมีศักยภาพความเป็นกรด องค์ประกอบเคมีของฝนกรดแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของฝนกรด

Species	Concentration μ eq L^{-1}		
	Sjoangen, Sweden 1973 – 1975	Hubbard Brook, New Hampshire 1973 – 1974	Pasadena, California 1978 – 1979
SO_4^{2-}	69	110	39
NO_3^-	31	50	31
Cl^-	18	12	28
NH_4^+	31	22	21
Na^+	15	6	24
K^+	3	2	2
Ca^{2+}	13	10	7
Mg^{2+}	7	32	7
H^+	52	114	39
pH	4.3	3.94	4.41

ที่มา : Seinfeld, 1986

ปัจจุบันพบการตกสะสมของกรดปรากฏปัญหาทั่วโลก (รูปภาพที่ 2) โดยโบราณสถานสำคัญของโลก 5 แห่ง กำลังเผชิญกับปัญหาวิกฤตจากฝนกรด (รูปภาพที่ 3) ข้อมูลจากภาพสอดคล้องกับข้อสรุปจากการวิจัยหลายงานที่ระบุว่า เมืองหรือย่านอุตสาหกรรมเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศสำคัญ อันเป็นสาเหตุหลักที่เร่งการเสื่อมสภาพของโบราณสถาน (Cheng et al., 1987; Manahan, 1994; Tambe et al., 1991) สำหรับประเทศไทย ปัญหาจากการสะสมของกรดอาจทวีความรุนแรงขึ้นได้ในอนาคตเช่นเดียวกับที่เกิดในประเทศอุตสาหกรรมที่พัฒนาแล้ว (กรมควบคุมมลพิษ, 2555) และจะก่อให้เกิดผลต่อสิ่งแวดล้อมศิลปกรรมทั้งทางตรงและทางอ้อมหลายประการ



รูปภาพที่ 2 พื้นที่โลกที่ประสบปัญหาฝนกรด
ที่มา : HRW., n.d.

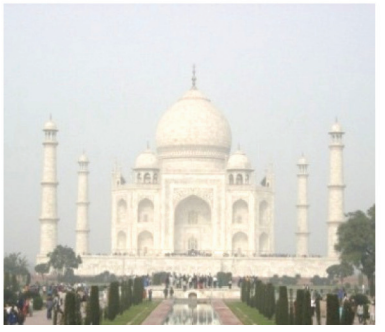
ผลกระทบของการสะสมของกรดต่อโบราณสถาน

ด้วยเหตุที่โบราณสถานส่วนมากตั้งอยู่ในเขตเมืองที่มีกิจกรรมการผลิตและการคมนาคมที่เข้มข้นมาก มลพิษทางอากาศที่พบจึงมักเป็นองค์ประกอบของเขม่า ฝุ่นละออง ก๊าซต่าง ๆ มลพิษเหล่านี้ถูกปล่อยออกมาแล้วตกสะสมบนผิววัสดุคล้ายเปลือกหุ้มสีดำ เรียกว่า black crust (Kontozova–Deutsch et al., 2011) ซึ่งจะพบมากเมื่อพื้นที่นั้นมีการสะสมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งนี้ เนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำให้หินปูนเปลี่ยนแปลงจาก $CaCO_3$ เป็น $CaSO_4$ หรือยิปซัม ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญที่ทำให้เกิด black crust

การสะสมของสารประกอบที่ทำให้เกิดฝนกรดบางชนิด อาทิ ซัลเฟอร์ออกไซด์ หรือไนโตรเจนออกไซด์ ยังทำให้วัสดุในโบราณสถานสึกกร่อน อาทิ ปูนขาว หินทราย หินอ่อน ไม้ศิลาแลง โลหะต่าง ๆ เผชิญปัญหาของการเปลี่ยนสี การสึกกร่อน ฯลฯ (Mink, 2009; Bravo et al., 2006; Zanardini et al., 2000; Tecer and Cerit, 2002) โดยเฉพาะวัสดุที่มีแคลไซต์เป็นองค์ประกอบซึ่งมีประสิทธิภาพดูดซับกรดไนตริคที่สูงมาก (Fenter et.al., 1995) สภาพดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงทำให้ทัศนียภาพโดยรวมของสิ่งแวดล้อมศิลปกรรมลดลง ตัวอย่างผลกระทบจากการเสื่อมสภาพของโบราณสถานจากการสะสมของกรด แสดงได้ดังรูปภาพที่ 4

(1)

(2)



(3)

(4)

(5)

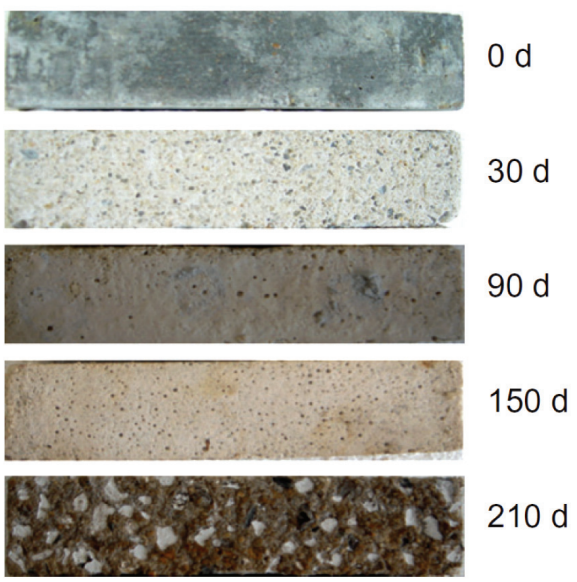
รูปภาพที่ 3 โบราณสถาน 5 แห่ง ที่ประสบวิกฤตปัญหาการสะสมของกรด
(1) Leshan Giant Buddha, Mount Emei (China, Buddhist) (2) Acropolis of Athens (Greece, Ancient Greek)
(3) Taj Mahal (India, Mughal Islam) (4) Dampier Rock Art Complex (Australia, Australian Aboriginal)
(5) Longmen Grottoes (China, Buddhist)
ที่มา : Mink, 2009

(1) ค.ศ. 1908

(2) ค.ศ. 1969

รูปภาพที่ 4 การเสื่อมสภาพของรูปปั้นหินทรายบน Herten Castle (Germany)
ที่สร้างเมื่อ ค.ศ. 1702 จากการสะสมของกรด
ที่มา : Westfaliches Amt fur Denkmalpfledge อ้างถึงใน Winkler, 1987

นอกจากนั้น การสะสมของกรดเป็นระยะเวลานานยังส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง ผลจากการวิจัยการเสื่อมสภาพของวัสดุประเภทคอนกรีต ซึ่งโบราณสถานบางแห่งใช้เพื่อปรับความแข็งแรงของรากฐานให้ผลดังรูปภาพที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมประสาน (Binder) สึกกร่อนหรือร่อนหลุดไป ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันของเนื้อวัสดุจะลดลง สภาพดังกล่าวอาจทำให้โบราณสถานไม่มั่นคงและเสียหายได้



รูปภาพที่ 5 ผลการเสื่อมสภาพของวัสดุจากฝนกรดในระยะเวลา 30, 90, 150 และ 210 วัน
ที่มา : Chen and Xie, 2013

นอกจากผลกระทบทางกายภาพที่เกิดขึ้นกับโบราณสถานจากการตกสะสมของฝนกรดแล้ว การตกสะสมของฝนกรดยังเป็นเสมือนคะตะลิสต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพทางชีวภาพด้วย โดยพบว่า จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเจริญบนหินได้มากขึ้นเมื่อหินนั้นได้รับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และอนุภาคทางอากาศบางอย่าง (Nuhoglu et al., 2005) ดังนั้น การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจึงเพิ่มโอกาสการเจริญของจุลินทรีย์หลายชนิดที่ใช้ธาตุอาหาร อาทิ แคลเซียม อะลูมิเนียม ซิลิกอน เหล็ก และโพแทสเซียมจากวัสดุในโบราณสถานโดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า Biosolubilization และ Biogeochemical (Herrera et al., 2004) ที่ทำให้วัสดุในโบราณสถานเสื่อมสภาพเช่นกัน

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า ผลกระทบจากปัญหาการสะสมของกรดของโบราณสถานในเขตเมืองนั้นเป็นเรื่องที่สำคัญยิ่ง เพราะส่งผลเสียอย่างชัดเจนต่อสภาพของโบราณสถานทั้งยังสัมพันธ์กับกระบวนการเสื่อมสภาพทางกายภาพและชีวภาพอื่น ๆ ที่ล้วนแต่จะทำให้โบราณสถานในเขตเมืองซึ่งเป็นมรดกของคนรุ่นหลังที่แสดงถึงความเป็นมาและรากเหง้าของสังคมสูญสิ้นไป มาตรการป้องกัน แก้ไข จากภาครัฐอาจไม่ทันการณ์ต่อปัญหาดังกล่าว แนวทางการอนุรักษ์ที่ดีที่สุดยังคงอยู่ที่การแก้ปัญหาที่ต้นทาง นั่นคือ การลดปริมาณก๊าซที่ก่อให้เกิดการสะสมของกรด ซึ่งเป็นสิ่งที่ทุกคนร่วมมือทำได้เพื่อให้โบราณสถานยังคงอยู่ และเพื่อเมืองยังคงสวยงามตลอดไป

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. 2555. **สารกรดในบรรยากาศ : มลพิษไร้พรมแดน** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.pcd.go.th/info_serv/air_aciddeposition.html [1 มกราคม 2556]

กรมอุตุนิยมวิทยา. ม.ป.ท. ฝนกรด [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://ozone.tmd.go.th/acid.htm [1 มกราคม 2556]

ภาษาอังกฤษ

Bravo, A. H., A. R. Soto, E. R. Sosa, A. P. Sańchez, J. A. L. Alarcoń, J. Kahl, and B. J. Ruiz. 2006. **Effect of acid rain on building material of the El Tajin archeological zone in Veracruz, Mexico**. Environmental Pollution 144 : 655-660.

Brown, P.W., and J.R. Clifton. 1988. **Mechanism of deterioration in cement-based materials and in lime mortar**. Durability Building Materials 5 : 409-420.

Chen, M.C., and K.W. Li Xie. 2013. **Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack**. Engineering Failure Analysis 27 : 272-285.

Cheng, R.J., J.R. Hwu, J.T. Kim, and S.M. Leu. 1987. **Deterioration of marble structures, the role of acid rain**. Analytical Chemistry 59 : 104A-106A.

Fan, Y.F., Z.Q. Hu, Y.Z. Zhang, and J.L. Liu. 2010. **Deterioration of compressive property of concrete under simulated acid rain environment**. Construction and Building Materials 24 : 1975-1983.

Fenter, F.F., F. Caloz, and M.J. Rossi. 1995. **Experimental Evidence for the Efficient "Dry deposition" of Nitic Acid on Calcite**. Atmospheric Environment 29 : 3365-3372.

Ghedini, N. I., A. Ozga, M. Bonazza, H. Dilillo, H. Cachier, and C. Sabbioni. 2011. **Atmospheric aerosol monitoring as a strategy for the preventive conservation of urban monumental heritage : The Florence Baptistery**. Atmospheric Environment 45 : 5979-5987.

Herrera, L.H., C. Arroyave, P. Guiamet, S. G. de Saravia, and H. Videla. 2004. **Biodeterioration of peridotite and other constructional materials in a building of the Colombian cultural heritage**. International Biodeterioration & Biodegradation 54 : 135 - 141.

Hordijk, L., and C. Kroeze. 1997. **Invited Review : Integrated assessment models for acid rain**. European Journal of Operational Research. 102 : 405-417.

Horemans, B., C. Cardell, L. Bencs, V. Kontozova-Deutsch, K. De Wael, R. Grieken, K. Deutsch, C. Cardell, M. Urosevic, E. Ruiz-Agudo, F. Deutsch, R. Van Grieken, **Evaluation of airborne particles at the Alhambra monument in Granada, Spain**. Microchemical Journal 99 : 429-438

JAPAN ENVIRONMENTAL SANITATION CENTER. N.d. **Mechanism of acid deposition** [Online]. Available from : http://www.acap.asia/acidrain/contents/img/pan021.gif [2013 January, 1]

Manahan, S.E. 1994. **Environmental Chemistry**. Lewis Publisher, CRC Press, Inc., Boca Raton

Mink, J. 2009. **Top 5 Endangered heritage sites-acid rain** [Online]. Available from: http:/ /archive.cyark.org/top5-endang ered-heritage-site-acid-rain -blog [2013, January 4]

Monforti, F., R. Bellasio, R. Bianconi, G. Clai, and G. Zanini. 2004. **An evaluation of particle deposition fluxes to cultural heritage sites in Florence, Italy**. Science of the Total Environment 334-335 : 61-72

Nuhoglu, Y., E. Oguz, H. Uslu, A. Ozbek, B. Ipekoglu, I. Ocak, and I. Hasenekoglu. 2006. **The accelerating effects of the microorganisms on biodeterioration of stone monuments under air pollution and continental-cold climatic conditions in Erzurum, Turkey**. Science of the Total Environment 364 : 272- 283.

Okochi, H., H. Kameda, S. Hasegawa, N. Saito, K. Kubota, and M. Igawa. 2000. **Deterioration of concrete structures by acid deposition-an assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field exposure experiments using mortar specimens**. Atmospheric Environment 34 : 2937 - 2945.

Primerano, P., G. Marino, S. Di Pasquale, L. Mavilia, and F. Corigliano. 2000. **Possible alteration of monuments caused by particles emitted into the atmosphere carrying strong primary acidity**. Atmospheric Environment 34 : 3889-3896.

Seinfeld, JH. 1986. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. John Willey & Sons. Inc.,

Tambe, S., K.L. Gauri, S. Li, and G.Cobourn. 1991. **Kinetic study of SO_2 reaction with dolomite**. Environmental Science and Technology 25 : 2071-2075

Tecer, L., and O. Cerit. 2002. **The effects of air pollution on carbonate stone monuments in urban areas (Sivas, Turkey)**. Fresenius Environ Bull 11 : 505-509.

Winkler, E.M. 1987. **Weathering and weathering rates of natural stone**. Earth and Environmental Science 9 : 85-92.

Zanardini, E., P. Abbruscato, N. Ghedini, M. Realini, and M. Sorlini C. 2000. **Influence of atmospheric pollutants on biodeterioration of stone**. Int Biodeterior Biodegrad 45 : 35-42.