

Penerapan *NDT (Non-Destructive Testing)* untuk Analisis Pelapukan Cagar Budaya Menggunakan Alat XRF; Studi Kasus Candi Mendut

Nahar Cahyandaru
Balai Konservasi Borobudur
nhrcahyandaru@yahoo.com

Abstrak: Cagar budaya merupakaninggalan budaya yang bernilai tinggi sehingga sangat penting untuk dilestarikan. Cagar budaya umumnya dijumpai dalam jumlah yang sangat terbatas dan telah mengalami pelapukan. Usaha konservasi material diperlukan untuk mempertahankan kelestariannya. Konservasi yang dilakukan memerlukan analisis sebagai dasar tindakan. Mengingat pentingnya cagar budaya maka sangat dibutuhkan metode pengujian yang bersifat tidak merusak bendanya (non-destruktif). Metode pengujian non-destruktif yang dikenal antara lain XRF (X-Ray Fluorescence). Kajian ini menguji penerapan alat XRF untuk memahami pelapukan cagar budaya, subjek yang dikaji adalah Candi Mendut.

Hasil kajian menunjukkan bahwa analisis dengan alat XRF menghasilkan data yang relatif akurat, cepat, dan mudah dilaksanakan di lapangan. Berdasarkan kandungan silika dalam sampel, batu-batu Candi Mendut belum mengalami pelapukan yang serius, kecuali bagian bilik dalam yang telah mengalami pelapukan dengan tingkat yang bervariasi. Pelapukan batu bilik diperkirakan akibat aktivitas mikroba karena tingginya kandungan fosfat dan sulfat dalam batu. Pelapukan pada dinding bagian luar yang cukup banyak diamati adalah terbentuknya endapan garam, penggaraman yang terjadi merupakan proses pengendapan garam silikat dan karbonat dengan kation yang dominan adalah kalsium. Pertumbuhan organisme pada permukaan batu terjadi pada batu jenis-jenis tertentu dengan komposisi yang berbeda. Batu yang ditumbuhi organisme mengandung besi, kalium, dan fosfor yang relatif rendah karena unsur-unsur tersebut merupakan nutrisi bagi metabolisme organisme. Udara tercemar turut mempengaruhi pelapukan batu Candi Mendut, ditandai dengan kandungan sulfur pada batu-batu candi. Namun kandungan tersebut belum menunjukkan adanya gejala pelapukan yang signifikan. Kandungan sulfur dalam endapan garam juga relatif rendah sehingga dampak udara tercemar tidak mempengaruhi penggaraman. Berdasarkan pengolahan dan interpretasi data yang dilakukan maka permasalahan pelapukan Candi Mendut dapat dipahami dengan lebih baik. Hasil analisis permasalahan pelapukan ini dapat menjadi acuan dalam pengambilan tindakan konservasi yang diperlukan.

Kata kunci : Analisis Non-Destuktif, XRF, Pelapukan batu, Candi Mendut

Abstract: Cultural heritage, as a valuable cultural remain, is very important to preserve. Cultural heritage is generally limited in number dan have experienced deterioration/weathering. Material conservation efforts are needed to maintain the sustainability of the object. Conservation process requires a precise analysis. Given the importance of the cultural heritage, testing methods that are non-destructive are needed. Non-destructive testing methods are still limited, although the technology is already developed. One of the non-destructive testing can be used is XRF (X-Ray Fluorescence) equipment. This study tested the XRF application for understanding the deterioration/weathering of cultural heritage, with the subject studied is Candi Mendut.

The study result shows that the XRF equipment can produce relatively fast and accurate data, while easily applied on the field. Based on the silica in the sample, stones of Mendut Temple has no yet experienced severe deterioration, except for the chamber that has undergone deterioration in varied level. The deterioration in chamber's stones is assumed to be caused by microbe activity ignited by high fospat and sulfure in the stone. Deterioration in outer wall mostly is salt deposit, in which sometimes is followed by formation of postule and alveol. The deposit is formed by precipitation process of silica and carbonit salt and calcium, which is the most dominant cation. The growth of microorganism on stone's surface occurs in certain stone type with varied composition. The stones with microorganisms has relatively low iron, potassium, and fospor. These compounds are nutrient for the microorganism's growth. Polluted air has effect also on the stone deterioration in Mendut Temple. The pollution is shown by the content of sulfur, although the content is not showing significant deterioration process yet. The sulfur in salt deposit is relatively low, which shows that the polluted air has no effect on the deposit. Based on the data analysis and interpretation, Candi Mendut material deterioration problems can be better understood. The results of the deterioration problem analysis can become a reference in determining the necessary conservation measures.

Keywords : Non-destructive analysis, XRF, Stone deterioration, Candi Mendut

A. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Kegiatan pelestarian cagar budaya merupakan pekerjaan yang harus dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Tindakan konservasi yang diambil harus didasarkan pada hasil analisis terhadap permasalahan yang terjadi. Berbagai metode analisis dapat dipergunakan untuk memahami permasalahan konservasi secara komprehensif, sehingga dapat dirumuskan rencana pelaksanaan konservasi yang sesuai.

Pelapukan cagar budaya merupakan salah satu permasalahan yang perlu ditangani dengan suatu metode konservasi. Metode konservasi yang tepat dapat diperoleh berdasar analisis kimia fisika, petrografi, dan lain-lain. Umumnya metode tersebut bersifat destruktif, karena memerlukan pengambilan sampel dan proses destruksi dalam analisisnya.

Cagar budaya merupakan kekayaan yang harus dijaga kelestariannya karena memiliki nilai penting yang tinggi. Oleh karena itu sebisa mungkin analisis yang dilakukan bersifat non-destruktif. Analisis yang menggunakan metode pengujian non-destruktif saat ini sangat diperlukan. Perkembangan teknologi saat ini memungkinkan berbagai teknik pengujian non-destruktif dilakukan. Berbagai peralatan pengujian non-destruktif saat ini telah tersedia dan mampu menghasilkan data analisis secara akurasi. Data yang dihasilkan belum dapat selengkap dan seakurat metode analisis destruktif, namun untuk keperluan pemahaman terhadap permasalahan konservasi seringkali sudah cukup memadai.

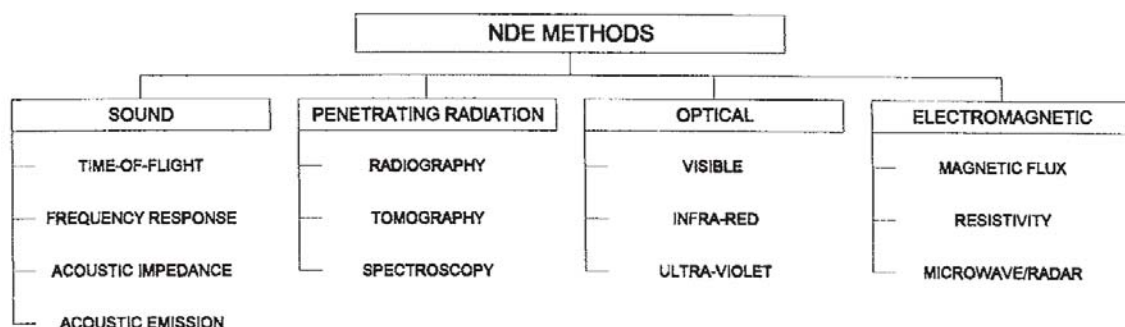
Salah satu metode analisis non-destruktif yang dapat digunakan dalam analisis pelapukan cagar budaya adalah pengujian dengan instrumen X-Ray

Fluorescence (XRF). Pengujian dengan alat XRF dapat memberikan data komposisi unsur secara semi-kuantitatif. Pengujian yang dilakukan tidak bersifat merusak benda, dapat dilakukan di lokasi, dan cepat. Hasil pengujian berupa komposisi unsur, meskipun masih semi-kuantitatif namun data yang dihasilkan sudah mendekati kuantitatif. Kelebihan tersebut membuat metode ini menarik untuk diterapkan pada analisis terhadap material cagar budaya. Pada kajian ini dilakukan pengujian batu Candi Mendut dengan alat XRF, dan dilanjutkan dengan analisis pelapukan yang terjadi. Dengan pengujian non-destruktif ini diharapkan telah dapat dilakukan analisis sehingga dapat diketahui proses dan faktor pelapukan yang terjadi. Hasil analisis diharapkan dapat dipergunakan sebagai dasar untuk melakukan tindakan konservasi yang diperlukan.

2. NDT (*Non-Destructive Testing*)

NDT (*Non-Destructive Testing*) adalah salah satu teknik pengujian material tanpa merusak benda ujinya. Pengujian tak rusak (NDT) dapat memainkan beberapa peran penting dalam analisis benda-benda dan bangunan bersejarah. Hal ini yang menyebabkan penerapan metode ini menarik di bidang arkeologi karena bermanfaat untuk konservasi. Metode non-destruktif testing terbatas pada beberapa metode saja yang memang bersifat tidak merusak benda uji. Pengujian non-destruktif dapat dikelompokkan seperti gambar berikut, yang membagi dalam empat kelompok utama, yaitu: suara, penetrasi radiasi, elektromagnetisme dan optik (Livingstone, 2001).

Pengetahuan dan hasil diagnosis status konservasi benda/bangunan bersejarah dapat digunakan untuk memahami permasalahan material dan struktural



yang terjadi serta mengarahkan pada pilihan model intervensi yang sesuai. Model penanganan yang perlu dilakukan misalnya usulan perbaikan atau perkuatan struktural dapat diketahui dari analisis struktural dan material non-destruktif. Analisis yang tepat terhadap struktural dan material dapat membantu dalam memahami tingkat kerapuhan dan meramalkan kondisinya di masa depan. (Binda and Saisi, 2001).

Dalam konservasi, metode analisis ilmiah digunakan untuk mengevaluasi material cagar budaya dan proses konservasinya. K. Janssens dan R. van Grieken dalam Svahn (2006) membagi metode analisis yang digunakan dalam konservasi menjadi tiga kelompok, sebagai berikut:

- Analisis terhadap material pembuat cagar budaya, yang meliputi semua komponen penyusunnya,
- Keadaan perubahan (di permukaan dan atau internal) benda sebagai hasil dari proses terpapar kondisi lingkungan tertentu dalam jangka pendek, menengah, dan panjang,
- Efek / efektivitas pelaksanaan konservasi / restorasi yang dilaksanakan, baik sebelum, selama, dan setelah aplikasi.

Penelitian modern pada material cagar budaya biasanya melibatkan penggunaan berbagai metode analisis dan teknik untuk memperoleh informasi dari bahan-bahan tersebut; dalam banyak kasus, komposisi kimia (elemen utama) merupakan informasi utama yang diperlukan (Schreiner, 2004).

Ada banyak metode yang berbeda yang dapat dilakukan, pemilihan metode yang akan dipergunakan tergantung pada tujuan analisis. Hal ini penting karena tidak mungkin untuk mendapatkan semua informasi yang diperlukan dari satu metode analisis tunggal. Konservator harus memilih dan merancang serangkaian tes yang memberikan informasi komplementer (saling melengkapi). Persyaratan metode analisis yang diperlukan cukup banyak, seperti tes harus non destruktif, cepat, universal, ekonomis, mampu reproduksi, mudah digunakan, sesuai tujuan, tersedia, sensitif dan tidak berbahaya bagi lingkungan (Lahanier et al. dalam Schreiner, 2004). Seperti disebutkan di atas, tidak semua tes sesuai dengan persyaratan tersebut, dalam

beberapa kasus perlu merusak secara mikro (misalnya uji ketahanan pengeboran mikro). Apabila semua tes dilakukan akan sangat mahal dan membutuhkan pengalaman. Konservator harus memperhatikan kriteria dan persyaratan, serta harus memilih metode yang menghasilkan data optimal ketika merancang sebuah program analisis (Svahn, 2006).

Penerapan teknik analisis non-destruksi awalnya dikembangkan di bidang ilmu material. Selanjutnya bidang arkeologi, seni, dan sejarah menerapkan metode ini untuk mengetahui komposisi bahan, serta mengetahui dari mana, kapan, atau oleh siapa artefak tersebut dibuat. Analisis non-destruktif ini juga berharga dalam beberapa kasus yang sangat diperlukan untuk kegiatan konservasi, untuk membedakan bagian-bagian asli atau penambahan dari objek, dan pengujian pemalsuan. Fenomena ini harus dipelajari secara ekstensif untuk memahami kinetika pelapukan dan untuk mengembangkan cara-cara konservasi dan untuk mencegah atau memperlambat proses ini (Janssens et al, 2000).

Kapsalas, et al (2007) melakukan penelitian yang diarahkan untuk menyelidiki pelapukan batu secara kuantitatif dengan deteksi non-destruktif. Permukaan yang diteliti dipantau melalui bantuan beberapa model pencitraan. Lebih khusus, digunakan *Fiber Optik Microscope* (FOM), kamera digital, dan sistem reflectography yang beroperasi pada spektrum pita sinar tampak. Beberapa algoritma selanjutnya diuji untuk mendeteksi pola pelapukan yang terjadi.

3. Permasalahan Pelapukan Candi Mendut dan Faktornya

Candi Mendut dan juga Candi Pawon merupakan candi yang tidak bisa dipisahkan dari Candi Borobudur, tidak hanya pada konsteks religi tetapi juga pada sejarah pembangunan dan pemugarannya. Candi Mendut dibangun pada masa yang tidak jauh dari Candi Borobudur, diperkirakan dibangun terlebih dahulu dibanding Candi Borobudur. Riwayat Candi Mendut hingga pemugaran pertama pada awal abad 20 serupa dengan Candi Borobudur. Dengan demikian usia dan riwayat pemugarannya identik dengan Candi Borobudur. Yang berbeda adalah Candi Borobudur kemudian mengalami pemugaran

kedua pada 1973-1983.

Candi Mendut yang telah berusia sangat tua mengalami berbagai permasalahan pelapukan material. Berbagai gejala pelapukan terjadi pada bagian dinding luar dan dinding dalam (bilik) candi. Kerusakan struktural juga terjadi, yaitu berupa penggelembungan, keretakan struktur, dan beberapa bagian yang mengalami deformasi. Pelapukan material yang teridentifikasi telah terjadi di Candi Mendut adalah :

- a. Penggaraman
- b. Postule dan alveol
- c. Pertumbuhan organisme
- d. Kerapuhan dan pengelupasan
- e. Kerusakan/pelapukan jenis lain

Berdasarkan pengamatan struktur bangunan serta lokasi dan keberadaan Candi Mendut, beberapa faktor teridentifikasi turut berperan pada terjadinya pelapukan batu. Faktor-faktor tersebut dapat berasal dari internal material atau bangunan serta dari faktor eksternal karena Candi Borobudur terletak di lingkungan terbuka. Berikut ini faktor-faktor yang teridentifikasi berperan secara signifikan dalam proses pelapukan batu Candi Mendut.

- a. Faktor Internal
 - 1) Jenis batu
 - 2) Struktur bangunan
 - 3) Material lain dalam bangunan
- b. Faktor Eksternal
 - 1) Suhu dan Kelembaban
 - 2) Penyinaran Matahari
 - 3) Air
 - 4) Organisme
 - 5) Udara dan pengaruh emisi kendaraan
 - 6) Asap dupa dalam bilik
 - 7) Manusia

B. METODE / PENGAMBILAN DATA

Untuk menghasilkan data yang valid, maka setiap kelompok sampel terdiri atas 5 batu yang mewakili populasi, dan setiap batu diambil 3 data untuk selanjutnya di rata-rata. Pengambilan data dilaksanakan langsung dilapangan terhadap batu-batu yang dianggap mewakili kelompok populasi. Pengukuran dengan alat *Handheld* XRF tidak

memerlukan pengambilan sampel dari permukaan batu, namun alat XRF langsung ditembakkan pada permukaan batu secara langsung dilapangan. Langkah pertama setelah pemilihan batu sampel adalah dengan mengkondisikan alat sesuai material yang diukur, yaitu untuk batu menggunakan setingan alat mode "Soil-plus". Kalibrasi dilakukan terhadap alat sebelum digunakan menggunakan keping standar bawaan alat. Pengukuran dilakukan dengan menempelkan ujung alat pada permukaan batu dan diaktifkan melalui layar sentuh pada alat. Posisi alat ditahan agar stabil pada permukaan batu selama kurang lebih satu menit sampai proses pembacaan alat selesai. Setiap selesai pengukuran dilakukan penyimpanan data (save) dan setelah selesai semua pengukuran data yang diperoleh diunduh dan disimpan dalam format MS-Excel.

Data yang dihasilkan dari XRF berupa data komposisi, namun masih perlu untuk diolah karena harus mengoreksi unsur dari komponen lain yang mengganggu. Beberapa komponen akan masuk sebagai bagian tidak terukur, yaitu unsur oksigen, hidrogen, nitrogen dan bahan organik, air dalam hal ini juga termasuk komponen yang tidak terukur dan harus dikoreksi.

Setelah dilakukan koreksi, untuk mengeliminir komponen tidak terukur maka dilakukan pengolahan data lebih lanjut dengan mengubah komponen silikon (Si) menjadi silika (SiO_2). Hal ini karena yang terukur pada alat adalah unsur, sementara kondisi sebenarnya silikon dalam batuan mayoritas adalah dalam bentuk senyawaan silika. Sedangkan unsur lainnya tetap sebagai unsurnya meskipun dalam batuan juga berupa mineral. Data hasil analisis kimia yang diperoleh ditampilkan di Tabel 1.

Data pada Tabel 1. merupakan data komposisi sampel batu hasil konversi dan koreksi, data tersebut menggambarkan kandungan unsur-unsur yang ada. Analisis dengan XRF menghasilkan data pengukuran untuk unsur-unsur tertentu terutama logam, sedang unsur lain non logam tidak terukur. Unsur yang dominan namun tidak terukur antara lain oksigen, hidrogen, nitrogen, dan senyawa organik. Sehingga data tersebut bukanlah kadar sesungguhnya (bukan prosentase berat unsur per berat sampel) dari unsur-unsur yang ditampilkan, tetapi menggambarkan

komposisi unsur yang ada.

Tabel 1. Kompilasi Data Hasil Pengukuran dengan XRF

No	Jenis sampel	Komposisi (%)										Total
		SiO ₂	Al	Fe	Ca	K	P	S	Ti	Mn	Unsur lain	
1	Batu sehat porus	75,82	8,25	7,38	5,59	1,57	0,10	0,13	0,77	0,16	0,23	100,00
2	Batu sehat porus	74,66	6,96	7,14	8,09	1,20	0,20	0,49	0,66	0,19	0,41	100,00
3	Batu sehat porus	70,33	11,27	7,32	7,01	1,95	0,34	0,38	0,74	0,20	0,46	100,00
4	Batu sehat porus	76,52	9,06	6,46	5,28	1,44	0,14	0,10	0,61	0,18	0,22	100,00
5	Batu sehat porus	71,27	11,27	6,80	4,62	1,85	2,64	0,61	0,58	0,19	0,19	100,00
6	Batu sehat kompak	73,91	11,99	6,05	4,93	1,18	0,61	0,13	0,58	0,17	0,45	100,00
7	Batu sehat kompak	71,34	11,38	6,14	7,36	1,64	0,96	0,18	0,61	0,18	0,22	100,00
8	Batu sehat kompak	68,85	10,10	7,96	8,36	1,37	0,44	0,62	0,70	0,21	1,38	100,00
9	Batu sehat kompak	70,47	9,51	7,32	7,98	1,57	0,35	1,27	0,75	0,20	0,60	100,00
10	Batu sehat kompak	67,38	5,72	5,65	17,09	0,78	0,56	1,04	0,49	0,21	1,06	100,00
11	Batu sehat kompak	65,78	5,15	7,15	18,00	0,67	0,42	1,00	0,48	0,20	1,14	100,00
12	Lapisan kuning	78,06	9,20	3,93	6,32	0,47	0,66	0,44	0,30	0,18	0,44	100,00
13	Lapisan kuning	78,53	8,12	4,62	6,25	0,45	0,66	0,50	0,32	0,17	0,39	100,00
14	Lapisan kuning	78,90	9,30	4,96	4,44	0,88	0,36	0,43	0,38	0,16	0,19	100,00
15	Lapisan kuning	76,75	7,14	5,17	5,23	0,85	0,44	0,40	0,46	0,19	3,37	100,00
16	Lapisan kuning	78,06	8,19	4,92	5,31	0,73	0,49	0,44	0,39	0,17	1,32	100,00
17	Batu yang bergaram	77,40	7,67	5,05	5,27	0,79	0,46	0,42	0,42	0,18	2,34	100,00
18	Batu yang bergaram	81,20	5,36	5,15	6,04	1,07	0,18	0,04	0,49	0,16	0,31	100,00
19	Batu yang bergaram	82,33	3,34	4,38	6,99	0,67	0,29	1,15	0,41	0,17	0,27	100,00
20	Batu yang bergaram	80,16	6,67	5,89	4,72	0,90	0,08	0,18	0,48	0,16	0,76	100,00
21	Garam pada batu	81,02	1,16	2,83	14,03	0,15	0,05	0,25	0,18	0,17	0,15	100,00
22	Garam pada batu	79,80	1,19	2,36	15,79	0,08	0,00	0,28	0,19	0,17	0,15	100,00
23	Garam pada batu	89,11	1,46	1,70	7,01	0,08	0,00	0,13	0,15	0,15	0,21	100,00
24	Garam pada batu	83,31	1,27	2,30	12,27	0,10	0,02	0,22	0,17	0,16	0,17	100,00
25	Garam pada batu	86,59	1,67	3,57	7,11	0,15	0,00	0,11	0,24	0,09	0,47	100,00
26	Batu dengan organisme	87,78	2,90	3,19	4,36	0,34	0,10	0,62	0,27	0,16	0,27	100,00
27	Batu dengan organisme	86,70	1,82	2,69	7,69	0,17	0,03	0,27	0,21	0,14	0,28	100,00
28	Batu dengan organisme	86,10	1,91	2,94	7,86	0,19	0,04	0,31	0,22	0,14	0,30	100,00
29	Batu dengan organisme	84,26	2,54	3,32	8,71	0,25	0,00	0,42	0,24	0,08	0,18	100,00
30	Batu dengan organisme	91,07	0,64	1,82	5,39	0,04	0,04	0,47	0,13	0,05	0,35	100,00
31	Batu baru pemugaran I	86,59	1,67	3,57	7,11	0,15	0,00	0,11	0,24	0,09	0,47	100,00
32	Batu baru pemugaran I	73,20	8,10	7,11	8,69	1,42	0,09	0,37	0,63	0,19	0,21	100,00
33	Batu baru pemugaran I	76,42	4,72	6,23	9,22	1,09	0,11	1,34	0,51	0,17	0,20	100,00
34	Batu baru pemugaran I	68,98	2,21	4,80	17,65	0,21	0,02	5,46	0,32	0,14	0,21	100,00
35	Batu baru pemugaran I	85,60	4,66	3,96	3,60	0,67	0,47	0,37	0,34	0,10	0,22	100,00
36	Batu baru	76,08	10,23	5,29	4,79	2,54	0,10	0,08	0,57	0,17	0,14	100,00
37	Batu baru	73,99	10,59	5,96	6,52	1,88	0,10	0,00	0,58	0,19	0,19	100,00
38	Batu baru	73,04	10,46	6,20	6,63	2,37	0,13	0,23	0,59	0,18	0,18	100,00
39	Batu baru	74,68	10,93	5,48	5,92	1,97	0,08	0,00	0,56	0,19	0,20	100,00
40	Batu baru	74,70	10,18	6,82	4,70	2,48	0,08	0,00	0,63	0,20	0,21	100,00
41	Batu dinding bilik dalam	72,69	8,35	3,70	4,61	2,33	6,08	0,87	0,43	0,09	0,85	100,00
42	Batu dinding bilik dalam	56,87	21,02	4,35	3,53	1,39	10,00	2,07	0,36	0,09	0,31	100,00
43	Batu dinding bilik dalam	43,56	2,78	1,70	27,83	0,16	7,77	13,31	0,17	0,35	2,39	100,00
44	Batu dinding bilik dalam	48,72	18,99	3,10	6,33	0,75	13,53	8,04	0,19	0,13	0,22	100,00
45	Batu dinding bilik dalam	23,95	29,64	2,18	5,79	3,35	28,60	5,29	0,19	0,17	0,85	100,00

HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data di atas, selanjutnya dilakukan analisis data untuk mengetahui gejala pelapukan yang terjadi dan memprediksi faktor-faktor yang mempengaruhi. Hasil analisis diharapkan dapat digunakan sebagai dasar untuk merumuskan program penanganan konservasi ke depan.

1. Kandungan SiO₂ dalam Batu

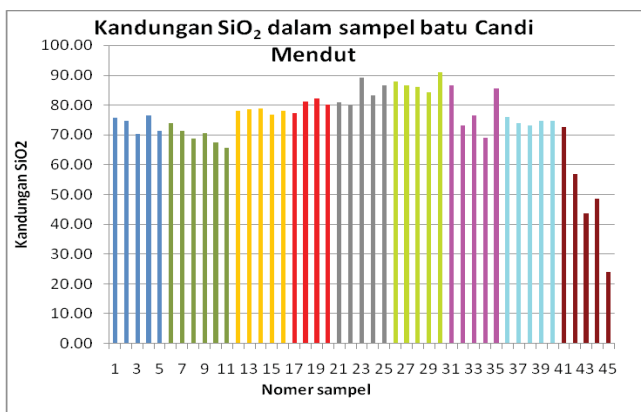
Batu andesit merupakan batuan baku dari produk vulkanik yang secara petrografi merupakan batuan berbasis mineral yang memiliki kandungan dominan silika. Oleh karena itu kandungan silika akan mencerminkan karakter batu, sehingga perlu dilakukan analisis perbandingan kandungan silika antar kelompok sampel. Data tersebut dituangkan dalam grafik pada Gambar 1.

Dari grafik pada Gambar 1 terlihat perbedaan kandungan silika dari berbagai sampel yang dianalisis. Batu yang sehat (tidak mengalami pelapukan) berada pada kisaran 70-76,5 % untuk batu porous dan 65,78-73,91 %. Kandungan silika yang tinggi ditunjukkan pada sampel batu yang ditumbuhi organisme (84,26-91,07 %). Kandungan silika yang rendah ditemukan pada batu bilik dalam dengan kandungan silika 23,95-72,69 %. Hal ini disebabkan karena kondisi permukaan batu bilik dalam yang lapuk dan terlihat adanya endapan garam yang sangat tebal. Batu yang mengalami pelapukan akan kandungan silikanya rendah. Karena silika merupakan kerangka penguat material, maka batu yang kandungan silikanya rendah lebih rapuh. Kandungan silika yang rendah ini juga disebabkan lapisan garam pada permukaan batu yang

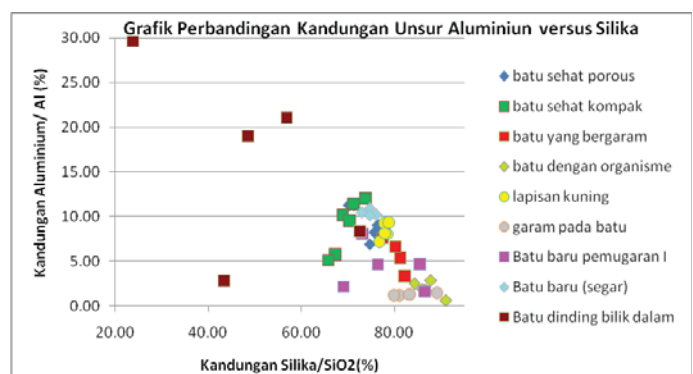
cukup tebal. Endapan tersebut merupakan produk proses pelapukan sehingga memiliki komposisi yang berbeda dengan batu. Adanya senyawa organik yang tinggi pada permukaan juga akan menyebabkan kandungan silika menjadi rendah. Senyawa organik tersebut bersumber dari proses pelapukan dan endapan asap dari pembakaran dupa dan lilin yang berlangsung terus-menerus.

2. Kandungan Aluminium

Kandungan aluminium dalam batu digambarkan dalam grafik perbandingan kandungan silika dengan aluminium pada Gambar 2. Berdasarkan grafik pada Gambar 2 dapat terlihat adanya pengelompokan kandungan silika versus aluminium yang tergambar dari titik-titik yang saling berkelompok. Kelompok titik-titik tersebut menunjukkan bahwa sampel yang diambil memiliki karakteristik yang tidak jauh berbeda. Dari grafik tersebut kandungan aluminium terlihat tidak terpola pada sampel batu bilik dalam, hal ini karena batu tersebut sudah mengalami pelapukan dengan tingkat yang bervariasi. Kondisi yang tidak berpola menunjukkan bahwa kondisi pelapukan batu bilik dalam berbeda-beda, baik tingkat maupun jenis pelapukannya. Pelapukan yang paling tinggi terjadi pada sampel no.45 yaitu sebesar 29,64 %. Batu andesit yang mengalami pelapukan akan berubah komposisi mineralnya. Mineral penyusun andesit akan berubah menjadi mineral lainnya, dan bentuk terakhir dari mineral yang sangat lapuk adalah lempung/clay. Lempung merupakan mineral tanah yang lunak dengan kandungan utama alumina



Gambar 1. Kandungan SiO₂ dalam Sampel untuk Setiap Kelompok Populasi



Gambar 2. Grafik Perbandingan Unsur Aluminium terhadap Silika Batu Candi Mendut

dan silikat. (lempung merupakan mineral yang tersusun oleh lapisan alumina dan silikat atau rasio $Si/Al = 1$ (kaolin) dan $Si/Al = 2$ (monmorilonit), jadi komponen utama lempung adalah Si dan Al). Oleh karena itu batu-batu pada bilik dalam mengandung aluminium dengan kadar tinggi karena telah mengalami pelapukan tingkat lanjut sehingga telah banyak terbentuk mineral clay. Namun hal ini masih merupakan hipotesis dan masih membutuhkan analisis lain untuk memastikan, misalnya dengan XRD.

Kandungan aluminium terendah ditunjukkan pada sampel endapan garam yaitu pada kisaran 1,16-1,67 %. Hal ini sangat jelas karena endapan garam terbentuk dari proses kimia pelarutan garam yang kemudian mengendap di permukaan. Peristiwa pengendapan garam umumnya melibatkan senyawa silikat dan karbonat, dengan gabungan beberapa kation terutama kalsium, magnesium, dan besi. Dalam prosesnya aluminium tidak terlibat karena senyawa aluminium umumnya tidak mudah larut, sehingga larutan yang akan mengering membentuk garam juga memiliki kandungan aluminium yang rendah. Oleh karena itu komposisi aluminium dalam endapan garam sangat rendah.

3. Kandungan Besi

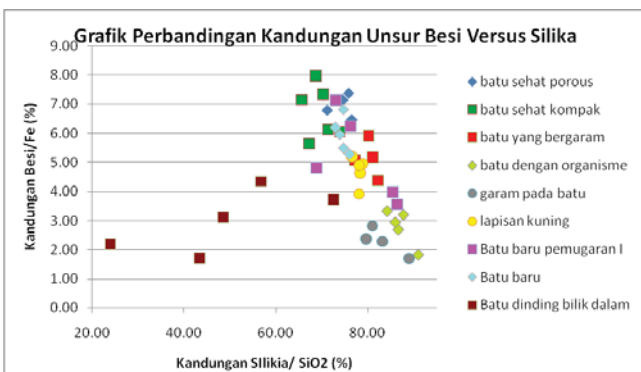
Kandungan besi ditunjukkan pada grafik perbandingan kandungan besi terhadap kandungan silika pada Gambar 3. Berdasarkan grafik pada Gambar 3 dapat terlihat bahwa masing-masing jenis sampel juga terlihat berkelompok, karena sesuai dengan

kesamaan karakteristik setiap kelompok sampel. Kandungan besi pada sampel bilik dalam terlihat paling acak, hal ini disebabkan karena sampel bilik dalam sudah mengalami pelapukan sehingga masing-masing memiliki kandungan yang berbeda sesuai dengan tingkat pelapukannya. Batu yang sehat baik porous maupun kompak dan batu baru yang segar dan dari pemugaran pertama, semuanya menunjukkan kandungan besi yang relatif tinggi. Hal ini karena batu-batu tersebut relatif belum mengalami pelapukan sehingga besi yang ada belum terdekomposisi dari batu. Kandungan besi pada batu dengan organisme relatif lebih rendah. Rendahnya kandungan besi ini dimungkinkan karena batu jenis ini rentan terhadap pertumbuhan organisme, selain itu besi juga salah satu jenis unsur nutrisi dari metabolisme organisme sehingga menjadi dapat berkurang akibat diserap untuk aktivitas organisme. Mekanisme ini masih perlu pengkajian lebih lanjut untuk mengetahui jenis andesit yang rentan pertumbuhan organisme.

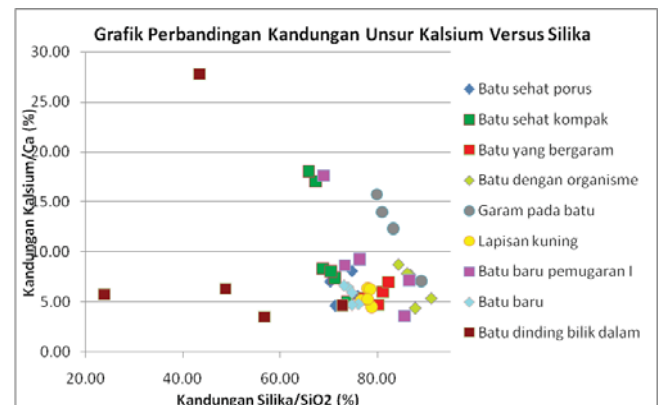
4. Kandungan Kalsium

Kalsium merupakan unsur yang ada dalam batu andesit, jumlahnya tidak dominan. Kalsium dominan pada batu kapur dan material yang dibuat dengan campuran kapur seperti mortar/plester. Kandungan kalsium pada batu andesit yang tinggi biasanya dipengaruhi oleh material lain. Kandungan kalsium dapat dilihat pada grafik pada Gambar 4.

Dari grafik pada Gambar 4 terlihat bahwa kandungan kalsium yang tinggi ditemukan pada sampel endapan garam dan sampel batu bilik dalam.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Unsur Besi terhadap Silika Batu Candi Mendut



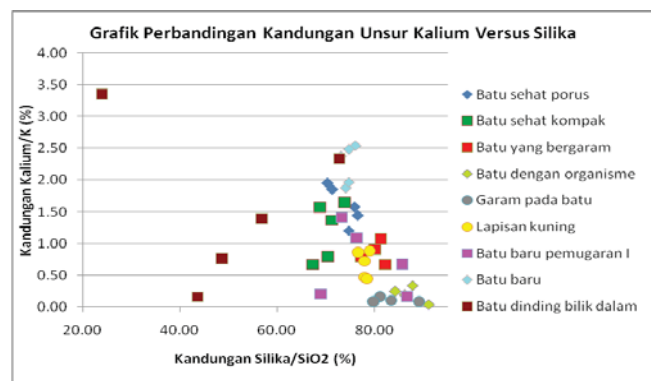
Gambar 4. Grafik Perbandingan Unsur Kalsium terhadap Silika Batu Candi Mendut

Sampel endapan garam merupakan material baru yang merupakan hasil pelapukan batu. Sehingga komposisi endapan garam akan berbeda dengan batu andesit. Dari proses pembentukannya, garam pada permukaan batu umumnya merupakan senyawa silikat dan karbonat yang berikatan dengan kation. Kation yang paling banyak ditemukan adalah kalsium. Hal ini sejalan dengan data yang ada dimana kandungan kalsium pada sampel endapan garam relatif tinggi dibanding sampel lainnya. Sampel batu bilik dalam juga demikian, karena sampel batu bilik dalam kondisinya juga tertutup endapan garam. Batu bilik dalam merupakan batu yang sudah mengalami pelapukan sehingga komposisinya merupakan campuran antara batu dan produk pelapukan, tergantung tingkat pelapukannya.

Sumber kalsium yang membentuk endapan garam pada Candi Mendut dapat berasal dari mortar yang ada bagian dalam struktru bangunan. Air yang meresap ke dalam bangunan dapat melarutkan kalsium yang ada dalam mortar dan mengendap di permukaan. Oleh karena itu penting untuk menjaga agar Candi Mendut tidak mengalami kebocoran di bagian atap. Sela-sela batu atap telah ditutup agar air tidak masuk, namun sistem ini harus dimonitor agar tidak mengalami kerusakan.

5. Kandungan Kalium

Kalium merupakan unsur yang ada secara alamiah dalam mineral penyusun batu andesit. Kalium pada dasarnya merupakan unsur yang mudah larut dan mudah bereaksi. Sehingga batu andesit yang sudah cukup tua dan lapuk akan memiliki kandungan kalium yang rendah. Berikut ini grafik pada Gambar



Gambar 5. Grafik Perbandingan Unsur Kalium terhadap Silika Batu Candi Mendut

5 kandungan kalium terhadap silika.

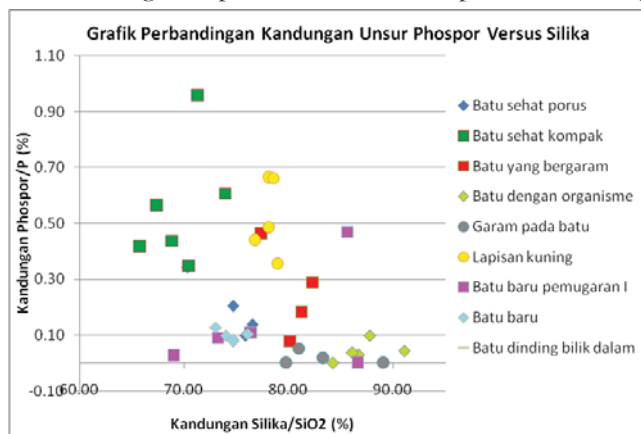
Dari grafik tersebut terlihat dengan jelas bahwa kelompok sampel batu baru (segar) memiliki kandungan kalium yang relatif paling tinggi dibanding sampel batu lainnya. Demikian juga dengan sampel batu sehat baik yang porous dan kompak juga relatif tinggi. Kandungan kalium yang tinggi dalam batu andesit menunjukkan bahwa mineral penyusun andesit yang mengandung kalium masih cukup stabil dan belum mengalami pelapukan.

Pada sampel endapan garam kandungan kalium relatif rendah karena garam kalium merupakan garam yang mudah larut sehingga tidak mengendap di permukaan membentuk endapan sebagaimana garam kalsium. Batu yang ditumbuhi organisme memiliki kandungan kalium yang rendah, hal ini dimungkinkan karena kalium merupakan salah satu nutrisi yang sangat dibutuhkan oleh organisme terutama organisme fotosintetik. Sehingga kandungan kalium dalam batu yang ditumbuhi organisme akan menurun karena diserap oleh organisme untuk metabolismenya.

6. Kandungan Fosfor

Fosfor pada dasarnya bukanlah unsur dalam mineral penyusun batu andesit. Unsur fosfor bisa ada dalam batu dalam bentuk senyawa fosfat yang mungkin terbentuk dalam proses pelapukan batu dan pengaruh lingkungan. Data menunjukkan bahwa kandungan fosfor relatif rendah untuk semua sampel kecuali sampel dari bilik dalam. Berikut ini grafik pada Gambar 6 yang menggambarkan kandungan fosfor dalam sampel.

Pada grafik pada Gambar 6 sampel batu dinding



Gambar 6. Grafik Perbandingan Unsur Fosfor terhadap Silika Batu Candi Mendut

dalam tidak digambarkan karena kandungannya relatif sangat tinggi dibanding sampel lainnya. Kandungan yang sangat ini terjadi karena batu bilik dalam sudah mengalami pelapukan. Tingginya kandungan fosfor dalam batu tersebut dapat dijadikan petunjuk penyebab pelapukan batu bilik dalam. Fosfor banyak dihasilkan dari aktivitas binatang yang mungkin dahulu tinggal di dalam bilik Candi Mendur. Binatang yang umum tinggal di dalam bilik candi adalah kelelawar dan burung. Kotoran kelelawar yang menumpuk di bagian dalam bilik akan diuraikan oleh mikroba menghasilkan bahan yang mengandung fosfat. Jika kotoran yang menempel pada batu semakin tebal maka kandungan fosfor dalam batu akan meningkat meskipun permukaan batu sudah dibersihkan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pelapukan yang terjadi pada bilik dalam Candi Mendut terutama disebabkan oleh aktivitas binatang yang tinggal dalam bilik di masa lalu. Sumber lain yang mungkin adalah asap pembakaran dupa dan lilin. Asap tersebut mengandung berbagai gas hasil pembakaran dan gas lain termasuk senyawa aromatik. Perlu pengkajian lebih lanjut untuk mengetahui komposisi asap dupa dan lilin serta perkiraan dampaknya terhadap batu candi.

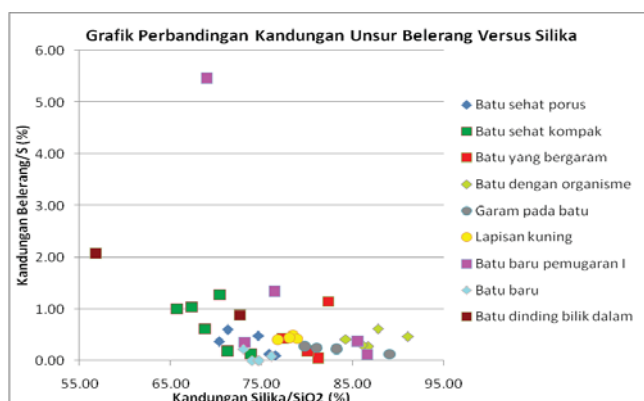
Kandungan fosfor yang rendah dijumpai pada sampel batu yang ditumbuhi organisme dan endapan garam. Endapan garam yang ada di Candi Mendut merupakan endapan silikat dan karbonat, sehingga fosfat tidak ditemukan dalam hal ini. Fosfat merupakan senyawa yang dibutuhkan oleh tumbuhan sebagai nutrisi, sehingga batu yang

ditumbuhi organisme akan kehilangan kandungan fosfatnya.

7. Kandungan Belerang

Kandungan belerang dalam sampel batu dapat dilihat pada Gambar 7. Belerang merupakan unsur yang tidak secara alami terdapat dalam mineral batu andesit. Sulfur ada dalam batu andesit akibat faktor eksternal, yaitu udara yang tercemar dan aktivitas mikroorganisme. Udara yang tercemar dapat bersumber dari alam seperti erupsi gunung api dan sumber non alam terutama pembakaran bahan bakar minyak yang mengandung sulfur. Untuk Candi Mendut sumber-sumber tersebut memungkinkan terjadi karena erupsi gunung api cukup sering terjadi dan lokasi candi yang berada di dekat jalan raya. Faktor mikroorganisme juga berpengaruh terutama batu bilik dalam, sebagaimana diuraikan pada analisis kandungan fosfor di atas. Bilik Candi Mendut kemungkinan pernah dihuni binatang dan kotorannya diuraikan oleh mikroorganisme menghasilkan senyawa sulfat dan fosfat yang masuk ke pori-pori batu.

Jika kita perhatikan grafik di atas, maka dapat dilihat bahwa kandungan sulfur yang rendah terdapat pada batu baru (segar). Hal ini karena batu tersebut masih alami dan belum terkena faktor-faktor eksternal yang meningkatkan kandungan sulfur. Sedangkan sampel-sampel lainnya mengandung sulfur relatif lebih tinggi. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa pengaruh eksternal turut berpengaruh pelapukan batu Candi Mendut. Pengaruh udara tercemar telah turut memberikan dampak pelapukan, meskipun perlu dikaji secara lebih mendalam kecepatan dampak tersebut. Perlu kajian lebih lanjut untuk mengetahui dampak udara tercemar terutama akibat lalu lintas kendaraan di jalan raya yang dekat dengan Candi Mendut terhadap pelapukan batu candi. Dari grafik tersebut terlihat bahwa kandungan sulfur dalam endapan garam relatif rendah, sehingga dapat dikatakan bahwa sulfat tidak berperan secara signifikan dalam pembentukan endapan garam, namun pada gejala pelapukan lainnya.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Unsur Belerang terhadap Silika Batu Candi Mendut

8. Rumusan Hasil Analisis

Hasil analisis pelapukan batu Candi Mendut yang dapat dirumuskan adalah sebagai berikut :

- a. Berdasarkan kandungan silika dalam sampel, batu-batu Candi Mendut belum mengalami pelapukan yang serius, kecuali bagian bilik dalam yang telah mengalami pelapukan dengan tingkat yang bervariasi.
- b. Pelapukan batu bilik diperkirakan akibat aktivitas mikroba karena tingginya kandungan fosfat dan sulfat dalam batu. Aktivitas mikroba tersebut dapat terjadi karena di masa lalu bilik Candi Mendut menjadi tempat tinggal binatang seperti kelelawar yang menghasilkan kotoran. Asap yang ditimbulkan dari pembakaran lilin dan dupa secara terus-menerus juga dapat berperan dalam pelapukan meskipun perlu kajian lebih mendalam.
- c. Pelapukan pada dinding bagian luar yang cukup banyak diamati adalah terbentuknya endapan garam yang sebagian diikuti dengan terbentuknya postule dan alveol. Penggaraman yang terjadi merupakan proses pengendapan garam silikat dan karbonat dengan kation yang dominan adalah kalsium. Tingginya kandungan kalsium dalam endapan garam menunjukkan adanya faktor material lain yang mengandung kapur, dalam hal ini adalah adanya mortar di dalam struktur bangunan yang dipasang pada pemugaran.
- d. Pertumbuhan organisme pada permukaan batu terjadi pada batu jenis-jenis tertentu dengan komposisi yang berbeda. Batu yang ditumbuhi organisme mengandung besi, kalium, dan fosfor yang relatif rendah karena unsur-unsur tersebut merupakan nutrisi bagi metabolisme organisme tersebut. Perlu kajian lebih dalam untuk mengetahui jenis dan karakter batu yang mudah mengalami pertumbuhan organisme dan pengendaliannya.
- e. Udara tercemar turut mempengaruhi pelapukan batu Candi Mendut, ditandai dengan kandungan sulfur pada batu-batu candi. Namun kandungan tersebut belum menunjukkan adanya gejala pelapukan yang signifikan. Kandungan sulfur dalam endapan garam juga relatif rendah sehingga

dampak udara tercemar tidak mempengaruhi pelapukan dalam bentuk penggaraman. Perlu kajian lebih lanjut untuk mengetahui dampak udara tercemar terhadap pelapukan batu Candi Mendut termasuk dampak emisi gas buang kendaraan dari jalan raya yang dekat dengan candi.

Berdasar permasalahan, analisis data, dan rumusan di atas maka dapat direkomendasikan beberapa program/kegiatan yang perlu dilaksanakan ke depan. Program/kegiatan tersebut yaitu:

- a. Melaksanakan kegiatan monitoring keterawatan batu-batu candi secara detail dan kontinu, untuk mengetahui perkembangan pelapukan yang terjadi
- b. Melaksanakan kegiatan perawatan batu-batu candi berupa pembersihan dan perbaikan
- c. Melaksanakan perawatan atap untuk mencegah terjadinya kebocoran
- d. Melaksanakan pemeliharaan kebersihan candi dari sampah dan pengotor lainnya
- e. Melaksanakan pemeliharaan lingkungan berupa pembersihan dan perawatan taman
- f. Penanaman pohon untuk tamanisasi sekaligus meningkatkan kualitas udara
- g. Penanaman pohon untuk penghalang emisi gas kendaraan dari jalan raya
- h. Melaksanakan kajian dampak emisi gas buang terhadap pelapukan batu candi
- i. Melaksanakan kajian dampak asap lilin dan dupa terhadap pelapukan batu candi
- j. Melaksanakan kajian pelapukan batu dinding bilik dalam dan metode penanganannya

C. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan di atas, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

1. Alat XRF dapat diterapkan untuk analisis pelapukan cagar budaya, dalam hal ini batu Candi Mendut. Analisis dengan alat XRF bersifat non-destruktif dan dapat menghasilkan data yang relatif akurat, cepat, dan mudah dilaksanakan di lapangan.
2. Berdasarkan pengolahan dan interpretasi data yang dilakukan maka permasalahan pelapukan

Candi Mendut dapat dipahami dengan lebih baik. Hasil analisis permasalahan pelapukan ini dapat menjadi acuan dalam pengambilan tindakan konservasi yang diperlukan.

Datar Pustaka

- Kapsalas P, Zervakis M, Maravelaki-Kalaitzaki P, Delegou E.T, Moropoulou A, (2007), *NDT Detection of Decay Areas and Evaluation of Their Attributes*, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece
- Svahn H, (2006), *Non-Destructive Field Tests in Stone Conservation; Literature Study*, Final Report for the Research and Development Project, Riksantikvarieämbetet
- Livingston R A, (2001), Nondestructive Testing of Historic Structures, *Archives and Museum Informatics* 13: 249–271, *Kluwer Academic Publishers*.
- Binda L and Saisi A, (2001), Non Destructive Testing Applied to Historic Buildings: The Case of some Sicilian Churches, *Historical Constructions, Guimarães*
- Janssens K, Vittiglio G, Deraedt I, Aerts A, Vekemans B, Vincze L, Wei F, Deryck I, Schalm O, Adams F, Rindby A, Knöchel A, Simionovici A, Snigirev A, (2000), Use of Microscopic XRF for Non-destructive Analysis in Art and Archaeometry, *X-Ray Spectrom.* 29, 73–91
- Schreiner M, Frühmann B, Jembrih-Simbürger D, Linke R, (2004), X-Rays In Art And Archaeology – An Overview, *Advances in X-ray Analysis, Volume 47*, International Centre for Diffraction Data