

IDENTIFIKASI KOMPOSISI MINERAL PADA FOSIL BERWARNA KEHITAMAN DAN KEMERAHAN DI SITUS SANGIRAN

IDENTIFICATION OF MINERAL COMPOSITION IN BLACKISH AND REDDISH FOSSILS AT THE SANGIRAN SITE

Irma Fadhila Putri¹, Mohammad Wahyu Ristiawan¹, Ernik Dwi Safitri², M. Rais Fathoni¹, Khofif Duhari Rahmat¹, Suwita Nugraha¹, Sayekti Wahyuning Sih³

¹Museum dan Cagar Budaya, Kementerian Kebudayaan, Indonesia

²Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

³Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

irmafadhilaputri@gmail.com; ristiawanwahyu@gmail.com; m.raizfathoni@gmail.com; khofifduharirahmat@gmail.com; suwitasangiran@gmail.com; ernikdwisafitri@gmail.com; sayekti_w@staff.uns.ac.id

Abstrak. Fosil yang ditemukan di Situs Sangiran memiliki beragam warna, diantaranya yaitu berwarna kehitaman dan kemerahan. Perbedaan mineral penyusun dalam proses fosilisasi bergantung pada lokasi pengendapan fosil, merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pewarnaan pada fosil. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi komposisi mineral yang dilihat dari penampakan visual fosil berwarna hitam dan merah serta menentukan rekomendasi konservasi yang tepat. Selanjutnya dilakukan analisis menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Fosil berwarna hitam memiliki sedimen berupa lempung, yang ditemukan keberadaannya pada Formasi Pucangan. Hasil analisa menunjukkan bahwa kandungan unsur kimia pada fosil berwarna hitam didominasi oleh unsur Mangan (Mn). Senyawa yang berkontribusi untuk memberikan warna hitam adalah $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ dan Mn_3O_4 . Dilihat dari morfologi permukaannya, fosil berwarna hitam memiliki tingkat kerapatan yang cukup tinggi dan sedikit rongga atau pori. Fosil yang berwarna merah memiliki sedimen berupa pasir sedang yang berada pada Formasi Kabuh, dimana kandungan unsur kimianya didominasi oleh Fe, Ni, Ti, Zn. Senyawa yang berkontribusi untuk memberikan warna merah adalah traskite dan wolfeite. Morfologi permukaan pada fosil berwarna merah memiliki bentuk tabung yang memanjang diselimuti oleh partikel bulat, dengan tingkat kerapatan antar partikel-partikel penyusunnya rendah dan memiliki rongga atau pori.

Kata kunci: Fosil Berwarna Hitam, Fosil Berwarna Merah, Komposisi Mineral, Morfologi Permukaan, Situs Sangiran

Abstract. The fossils found at the Sangiran Site have various colors, including blackish and reddish. Difference of mineral composition in the fossilization process that depend on the location of fossil deposition is one of the factors that affects the coloring of fossil. This study aims to identify the mineral composition of black and red fossils and to determine conservation recommendations. The fossil was analyzed by X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM). Black fossils have clay sediment located in the Pucangan formation. The result showed that the chemical element of black fossils is dominated by Manganese (Mn). The compounds that contribute to the black color are $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ and Mn_3O_4 . Based on its surface morphology, black fossils have a fairly high density and few cavities or pores. Red fossil have sediment in the form of medium sand located in the Kabuh Formation, where the chemical element is dominated by Fe, Ni, Ti, Zn. The compounds that contribute to the red color are traskite and wolfeite. The surface morphology of the red fossil has an elongated tube shape covered by round particles, with a low-density level between the constituent particles and has cavities or pores.

Keywords: Blackish Fossil, Reddish Fossil, Mineral Composition, Surface Morphology, Sangiran Site

DOI: 10.55981/konpi.2024.98

1 Pendahuluan

Fosil merupakan sisa, jejak organisme dari zaman lampau yang telah terawetkan di kerak bumi. Data mengenai fosil adalah sumber informasi utama tentang sejarah kehidupan di bumi. Organisme yang terkubur dalam sedimen dapat mengalami perubahan, antara lain yaitu peristiwa larutan mengisi celah, pori-pori, cangkang atau tulang dengan kalsium karbonat atau garam mineral dan memfosilkan sisanya, yang dikenal sebagai permineralisasi. Selain itu, terdapat juga peristiwa mineralisasi yaitu penggantian bahan kerangka asli dengan materi mineral (Encyclopaedia Britannica, Inc., 2020). Proses perubahan menjadi fosil ini dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti air tanah dan komposisi sedimen, hidrologi tanah dan pH, potensial redoks suhu, tekanan mekanik, faktor biologis, dan transportasi partikel (Reiche, I. et al. 2003). Komposisi unsur dominan yang terkandung pada fosil antara lain S, Fe, Sr (Montgelard, et al., 1997), Mn, Al, dan Si (Dumont, et al., 2009). Unsur Si dan Al merupakan unsur yang memiliki jumlah relatif tinggi pada sedimen tanah. Sehingga unsur Si dan Al identik dengan ciri khas unsur yang terdapat pada fosil.

Lokasi pengendapan fosil fauna koleksi Museum Sangiran, ditemukan dari lingkungan air dan darat atau dalam tanah. Secara geologi, van Es (1931) dan van Bemmelen (1949) membagi litostratigrafi di Sangiran menjadi empat Formasi, yaitu Formasi Kalibeng, Formasi Pucangan, Formasi Kabuh, dan Formasi Notopuro. Formasi Kalibeng merupakan lingkungan laut dalam dan formasi paling tua sekitar 2,4 juta tahun yang lalu serta mempunyai sedimen lempung biru. Formasi Pucangan merupakan lingkungan rawa berusia sekitar 1,7 juta tahun yang lalu dan mempunyai dua bagian yaitu unit lahar bawah dan batu lempung hitam. Formasi Kabuh merupakan lingkungan darat didominasi hutan terbuka dengan banyak aliran sungai. Formasi ini berlangsung dari 730 ribu tahun hingga 250 ribu tahun yang lalu. Formasi Kabuh tersusun oleh perlapisan lempung, lanau, batupasir dan tuf, serta lapisan Grenzbank yang digunakan sebagai penanda batas antara Formasi Pucangan dengan Formasi Kabuh. Formasi Notopuro berlangsung sekitar 250 ribu hingga 100 ribu tahun yang lalu dan merupakan petunjuk akan erupsi besar dari gunung api yang berada di sekitar Cekungan Solo. Formasi Notopuro ini terdiri dari gravel, pasir, lanau, dan lempung yang mencirikan lingkungan pengendapan darat.

Berdasarkan segi fisik, fosil yang ditemukan memiliki beragam warna, diantaranya yaitu berwarna kehitaman dan kemerahan. Hal ini dimungkinkan karena adanya perbedaan jenis unsur penyusun dalam proses fosilisasi, yang sangat bergantung pada lokasi pengendapan fosil tersebut. Perubahan warna pada tulang atau fosil merupakan salah satu bagian dari tafonomi. Tafonomi adalah studi tentang sejarah pra penguburan dan pasca penguburan dari sisa-sisa fauna, dapat digambarkan sebagai proses yang dialami organisme dari saat kematian hingga penemuannya sebagai sebuah fosil (Lyman, R.L., 1994). Terdapat 2 proses yang mempengaruhi perubahan warna pada tulang, yaitu proses anorganik dan organik. Proses anorganik meliputi efek lindi/ *bleaching* pada air, deposisi mineral, dan api. Sementara proses organik meliputi deposisi karbon, aktivitas manusia, asam organik pada tanah, pertumbuhan akar, dan serangan mikroba.

Oleh karena itu, dilakukan identifikasi komposisi mineral pada fosil berdasarkan warna penyusunnya. Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana mengidentifikasi karakteristik fosil yang secara visual berwarna kemerahan dan kehitaman ditinjau dari hasil analisis XRF, XRD, dan SEM-EDX. Hasil dari karakteristik tersebut nantinya dapat digunakan sebagai bahan referensi arkeolog dan peneliti lain dalam memperluas ilmu pengetahuan yang berkaitan dengan fosil yang ditemukan di situs prasejarah Sangiran. Selain itu, informasi komposisi mineral pada fosil berwarna kehitaman dan kemerahan dapat digunakan untuk penentuan metode konservasi yang tepat berdasarkan tingkat kerapuhannya serta dapat menambah informasi mengenai fosil yang semakin lengkap.

2 Metode

Metode penelitian dilakukan dengan metode eksperimen di laboratorium. Sampel yang digunakan adalah fragmen fosil fauna koleksi Museum Sangiran yang ditemukan di Situs Sangiran dalam kondisi kering, yang memiliki warna kehitaman dan kemerahan. Sampel fragmen fosil masing-masing menggunakan tiga fragmen fosil kehitaman dan tiga fragmen fosil kemerahan. Klasifikasi warna sampel dilakukan berdasarkan *Munsell Rock Color Book*. Sampel dikarakterisasi unsur kimianya menggunakan instrumen Handheld XRF (*X-Ray Fluorescence* Bruker Tracer 5g), kandungan senyawa kimia menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction* Bruker D2 Phaser), dan struktur morfologi permukaan sampel menggunakan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Phenom Desktop ProXL*).

3 Hasil Penelitian

3.1 Hasil Analisis XRF

Setiap kelompok warna terdapat 3 sampel fragmen fosil yang diuji menggunakan *handheld XRF* yang terdapat di Museum Sangiran. Hasil pengujian pada fragmen fosil berwarna hitam yaitu incisivus Proboscidea (sampel 1), costae Elephantidae (sampel 2), dan satu fosil yang belum diidentifikasi (sampel 3) ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan unsur ketiga fosil yang berwarna hitam (dalam satuan persen)

Unsur Kimia	Jenis Sampel (%)		
	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3
Ca	23,4966	29,3213	27,3972
SiO ₂	11,0137	4,5352	0
P	1,4868	4,3356	12,4871
Al ₂ O ₃	3,655	1,6917	0
Fe	1,7938	1,3649	1,6577
MgO	0,9631	0	0
Mn	5,24	2,9301	2,1679
K ₂ O	0,2008	0,147	0,0294
Y	0,001	0,0038	0,1338
Ti	0,0699	0,1304	0,0062
Ni	0,0059	0,0037	0,003
Zr	0,0016	0	0
Zn	0,0045	0,0059	0,0057
Cu	0,0019	0,002	0,0013
U	0,0016	0,0025	0,0059
Cd	0,002	0,0011	0
Mo	0,0013	0,0016	0,0029

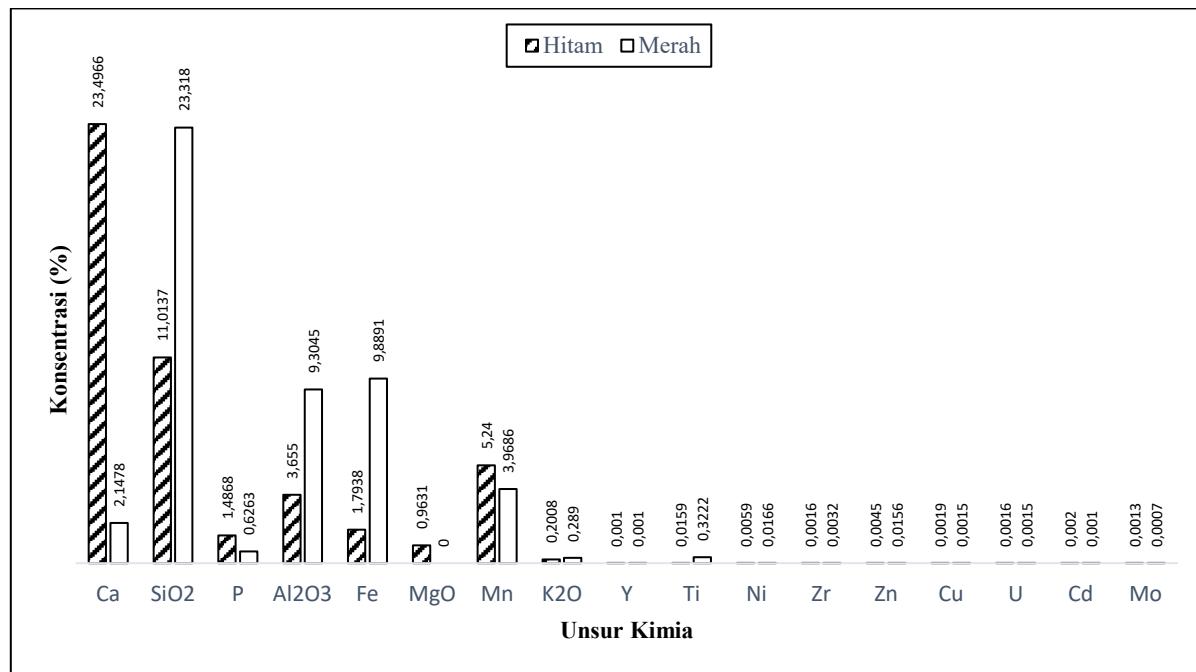
Unsur dominan pada sampel fragmen fosil dengan konsentrasi tertinggi adalah Ca, Si, P, dan Mn. Menurut Fernandez-Jalvo dan Andrews (2016), warna hitam pada tulang dikarenakan adanya kandungan manganese (Mn). Dari ketiga sampel fragmen fosil berwarna hitam tersebut unsur Mn memiliki rentang nilai antara 2,1679% – 5,24%, dengan jumlah relatif Mn tertinggi sejumlah 5,24% dimiliki oleh sampel 1 yaitu incisivus Proboscidae yang berwarna *dark gray*.

Hasil pengujian XRF berupa unsur kimia pada fosil berwarna merah yang terdiri dari fosil molar Stegodon (sampel 4), mandibula sinistra Stegodon (sampel 5), dan scapula Proboscidea (sampel 6) ditunjukkan pada Tabel 2. Menurut Fernandez-Jalvo dan Andrews (2016) warna coklat kemerahan pada tulang berasal dari tanah yang mengandung besi (Fe) dengan jumlah yang cukup tinggi. Pada penelitian ini, unsur Fe yang ditunjukkan pada Tabel 2, berada pada rentang nilai 6,0086% - 9,8891%. Nilai unsur Fe tertinggi terdapat pada sampel ke-5 dengan warna *Moderate Reddish Brown*.

Tabel 2. Perbandingan unsur ketiga fosil yang berwarna merah (dalam satuan persen)

Unsur Kimia	Jenis Sampel (%)		
	Sampel 4	Sampel 5	Sampel 6
Ca	17,1051	2,1478	11,6015
SiO ₂	12,3815	23,318	35,2183
P	7,6191	0,6263	3,1479
Al ₂ O ₃	4,3785	9,3045	4,1014
Fe	6,0086	9,8891	9,1227
MgO	0	0	1,2933
Mn	0,3876	3,9686	0,2368
K ₂ O	0,1484	0,289	0,0703
Y	0,0229	0,001	0,2208
Ti	0,1761	0,3222	0,0538
Ni	0,0061	0,0166	0,013
Zr	0,0027	0,0032	0,0016
Zn	0,0072	0,0156	0,0066
Cu	0,002	0,0015	0,0031
U	0,0034	0,0015	0,0125
Cd	0,0012	0,001	0,001
Mo	0	0,0007	0,0035

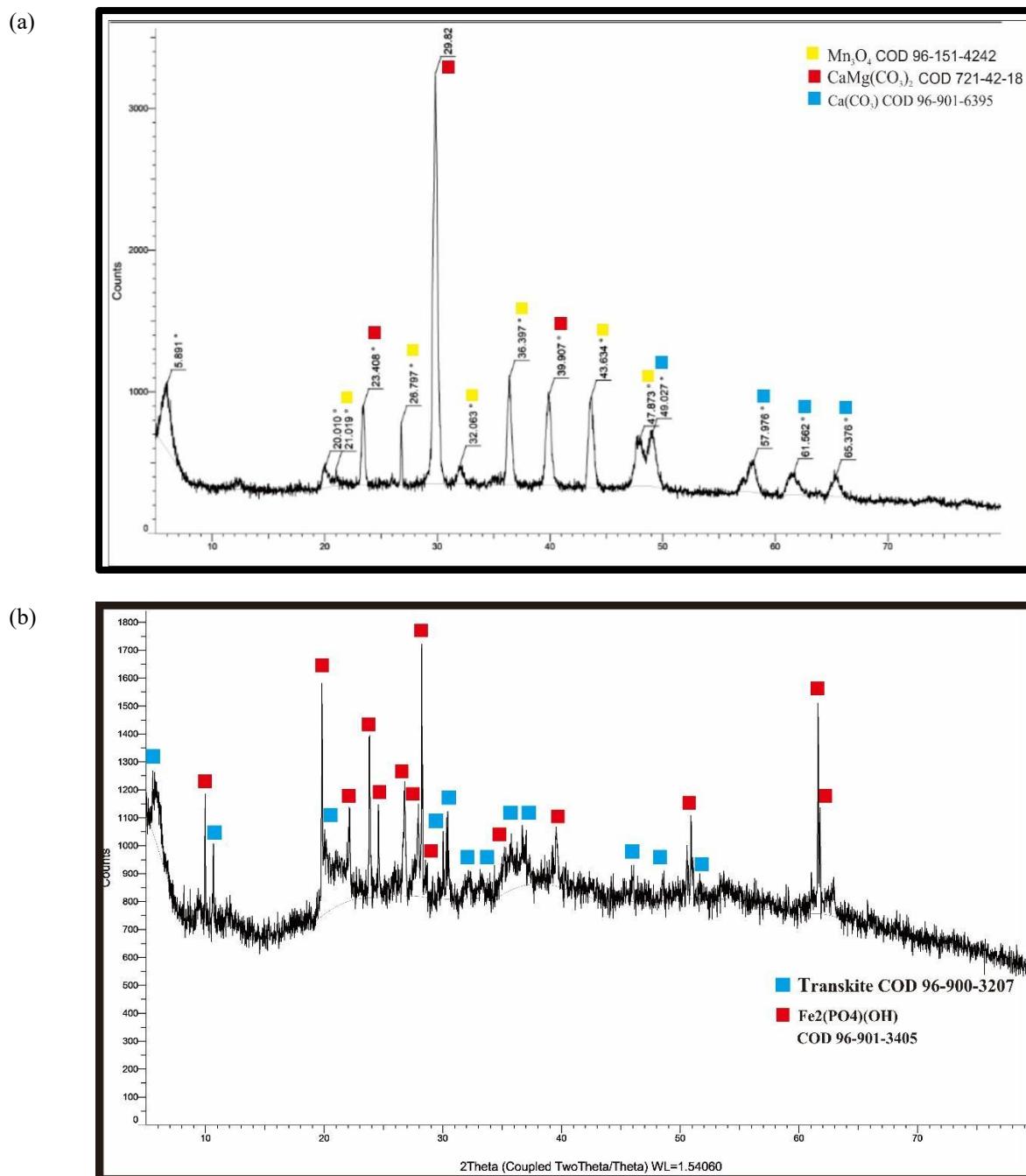
Sampel ke-1 fosil warna hitam dan sampel ke-5 fosil warna merah dibuat perbandingan grafiknya, seperti yang terdapat pada Gambar 1. Untuk selanjutnya kedua fosil yang terpilih tersebut dilanjutkan pengujian menggunakan XRD dan SEM-EDX.



Gambar 1. Grafik perbandingan unsur kimia fragmen fosil hitam (sampel 1) dan fragmen fosil merah (sampel 5). Sumber: (Penulis)

3.2 Hasil Analisis XRD

Hubungan antara mineralogi fosil dengan tingkat kerapuhan fosil dapat diuji menggunakan XRD untuk mengetahui bentuk senyawa dan kristalografinya, serta nilai densitas berdasarkan data referensi standar seperti COD (*Crystallography Open Database*) dan ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). Hasil uji XRD terdapat pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2a, terdapat beberapa struktur kristal yang terbentuk pada fosil berwarna hitam. Struktur kristal yang terbentuk antara lain $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ dalam bentuk Trigonal (Falini, 1998), Mn_3O_4 dalam bentuk Orthorhombic (Borodin, 1979), serta $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ dalam bentuk monoclinic (Merrill, 2005).



Gambar 2. Hasil Uji XRD pada sampel fosil (a) berwarna hitam (sampel 1) dan (b) berwarna merah (sampel 5). Sumber: (Penulis)

Gambar 2b, menunjukkan struktur kristal yang terbentuk pada fosil berwarna merah antara lain yaitu Wolfeite ($\text{Fe}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$) dalam bentuk Monoclinic (Hatert, 2007) dan Traskite ($\text{Ba}_{24}\text{CaCl}_6\text{Fe}_{10}\text{H}_{58}\text{O}_{122}\text{Si}_{24}\text{Ti}_6$) dalam

bentuk Hexagonal (Warr, 2021). Kedua struktur kristal tersebut berkontribusi untuk memberikan warna kemerahan pada fosil. Selain bentuk senyawa dan struktur kristal, diperoleh juga nilai densitasnya yang terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Densitas Fosil dari Hasil XRD

Warna Fosil	Struktur Kristal	Densitas (g/cm ³)
Hitam	CaMg(CO ₃) ₂	2,73
	Mn ₃ O ₄	5,961
	Ca(CO ₃)	2,774
Merah	Wolfeite (Fe ₂ (PO ₄)(OH))	2,63
	Traskite (Ba ₂₄ CaCl ₆ Fe ₁₀ H ₅₈ O ₁₂₂ Si ₂₄ Ti ₆)	3,44

3.3 Hasil Analisis SEM-EDX

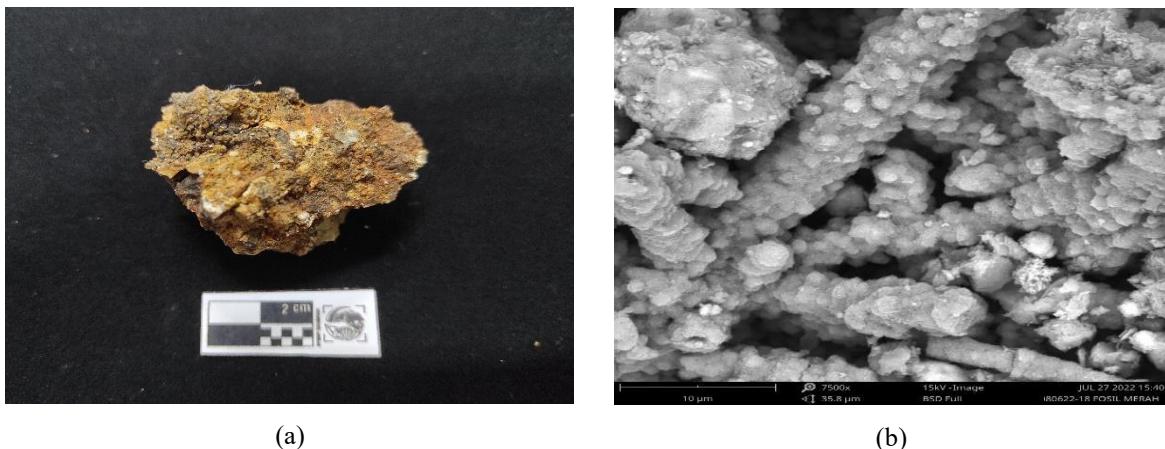
Selain menggunakan XRF, analisis unsur kimia pada fosil juga diuji menggunakan SEM-EDX. Pengujian menggunakan 2 contoh fragmen fosil untuk tiap warna fosil berbeda yang memiliki kandungan unsur tertentu dengan jumlah persentase tinggi dilihat dari data XRF (sampel 1 dan sampel 5). Terdapat beberapa unsur yang dapat terbaca di EDX, namun tidak terbaca di XRF yaitu unsur ringan O (Oksigen) dan C (Carbon). Hal ini dikarenakan unsur ringan tersebut mempunyai nilai energi dan nomor atom yang kecil, membuat sinar-X yang dimiliki terlalu lemah untuk merambat kembali ke detektor alat XRF, sehingga nilainya tidak dapat terbaca di XRF. Untuk unsur Oksigen, fosil warna hitam memiliki nilai sebesar 53,06%. Dimana nilai persentasenya lebih tinggi daripada fosil warna merah yang nilainya sebesar 52,31%. Hal yang sama juga terjadi pada unsur Carbon, dimana fosil warna hitam juga memiliki persentase lebih tinggi yaitu 13,11% dibanding fosil warna merah, yang hanya memiliki nilai 7,04%.

Analisis morfologi permukaan fosil dilakukan dengan menggunakan SEM-EDX. Morfologi permukaan fosil warna hitam (sampel 1) ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3, terlihat bahwa fosil berwarna hitam memiliki bentuk dan ukuran partikel yang heterogen, serta terdapat rongga diantara partikelnya.



Gambar 3. Morfologi permukaan fosil warna hitam (sampel 1) (a) menggunakan kamera dan menggunakan SEM-EDX dengan perbesaran (b) 7500x. Sumber: (Penulis)

Analisis morfologi permukaan fosil warna merah (sampel 5) ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat bahwa fosil berwarna merah memiliki bentuk partikel tidak beraturan dan memiliki kerapatan partikel yang kecil. Morfologi fosil merah berbentuk tabung memanjang di bagian luar diselimuti partikel-partikel bulat, tabung-tabung tersebut bersatu pada salah satu pangkal tertentu.



Gambar 4. Morfologi permukaan fosil warna merah (sampel 5) (a) menggunakan kamera, dan menggunakan SEM-EDX dengan perbesaran (b) 7500x

4 Diskusi

Berdasarkan hasil analisis unsur kimia, dipilih satu fosil dari masing-masing warna yang memiliki unsur tertentu dengan jumlah yang relatif tinggi. Unsur tertentu yang menjadi penentu pemilihan fosil merupakan unsur mayor (Fe, Mn, Ca, Si, Al, P, Mg) berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Fernandez-Jalvo dan Andrews tahun 2016. Unsur mayor adalah unsur yang keberadaannya di alam memiliki jumlah yang cukup banyak. Unsur utama tulang yaitu Kalsium (Ca) dan Phosphor (P) yang terdapat pada mineral hidroksiapatit dengan rumus kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (Samuelson, 2007 dan Ainunnisa, 2013). Berdasarkan Gambar 1, unsur yang mensubtitusi unsur Ca dan P dalam pembentukan warna merah dan hitam selama proses fosilisasi, diidentifikasi dari unsur-unsur transisi yang memiliki konsentrasi relatif tinggi untuk setiap warna. Untuk fosil warna merah, unsur yang memiliki persentase relatif tinggi yaitu Fe, Ni, Ti, Zr, Zn. Hal ini berbanding lurus dengan penelitian McNamara (2013), dimana warna merah-coklat pada fosil menunjukkan adanya logam Fe. Sementara untuk warna hitam, unsur tertinggi dimiliki oleh Mn, Cd, Mo dan Mg. Pada fosil warna hitam, unsur Ca dan P menurun, sementara unsur Mn meningkat persentasenya dibandingkan dengan fragmen fosil warna merah. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh López-González, et al (2006) dan Brown, et al (2014), bahwa perubahan warna menjadi hitam pada fosil disebabkan oleh adanya kandungan Mn yang tinggi dari lingkungan pengendapan. Warna hitam atau gelap, menunjukkan bahwa waktu terendapkannya lebih tinggi sehingga proses fosilisasinya berjalan lebih lama.

Menurut Cohen et al. (2017) unsur kalsium (Ca) sebagai unsur utama tulang memiliki sifat yang tidak stabil selama proses fosilisasi. Unsur Ca dapat terlepas akibat perubahan lingkungan dan erosi yang terjadi sejak organisme mati hingga ditemukan. Unsur-unsur anorganik seperti besi, tembaga, nikel, dan lainnya yang berasal dari lingkungan atau tanah dapat menggantikan unsur kalsium yang terdapat pada tulang dan memberikan karakteristik tertentu pada fosil seperti warna fosil (Fernandez-Jalvo dan Andrews, 2016).

Berdasarkan hasil uji XRF, pada fosil berwarna hitam (sampel 1), unsur kalsium (Ca) dan fosfor (P) pada mineral hidroksiapatit dari tulang mengalami penurunan jumlah konsentrasi serta peningkatan unsur magnesium (Mg) yang berasal dari sedimen/ tanah, jika dibandingkan dengan sampel 2 dan 3. Sehingga dapat dikatakan bahwa mineral hidroksiapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) dari tulang yang sudah terkubur lama mengalami perubahan mineral baru membentuk senyawa kristal $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ yang lebih kuat, seperti pada hasil uji XRD yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kehadiran unsur Mg dalam fosil yang berwarna hitam dimungkinkan menggantikan unsur P yang mempunyai muatan lebih besar dan lebih mudah lepas. Warna hitam merupakan kontribusi dari kristal $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (Stanienda-Pilecki, 2018) dan Mn_3O_4 (*Handbook of mineralogy* dan Sukhdev, 2020). Fosil warna hitam tersebut ditemukan di Formasi Pucangan, dimana Formasi ini dulunya adalah lingkungan rawa. Paparan air teroksidasi dari air rawa dapat mendorong munculnya kristal mangan dioksida (MnO_2). Sementara kristal $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ merupakan senyawa yang terdapat pada tulang yang masih ada, sehingga dimungkinkan bahwa tulang tersebut belum terfossilisasi secara sempurna. Hal ini sesuai dengan data EDX, dimana pada fosil warna hitam, unsur C dan O memiliki nilai persentase tertinggi. Sementara pada fosil berwarna merah, unsur Ca memiliki

jumlah persentase yang rendah dan unsur Fe tinggi. Hal tersebut dapat mengindikasikan bahwa terjadi perubahan struktur kristal tulang berubah menjadi struktur kristal lain yaitu Wolfeite ((Fe₂(PO₄)(OH)) akibat penambahan jumlah Fe pada fosil berwarna merah. Wolfeite merupakan mineral yang berwarna coklat kemerahan, mineral tersebut diberi nama oleh ahli geologi dari Boston University tahun 1980 dan Traskite merupakan batuan yang berwarna merah-kecoklatan (Warr, 2021).

Morfologi permukaan fosil warna hitam terletak pada Gambar 3. Adanya warna hitam (*dark gray*) pada fosil incisivus Proboscidea disebabkan karena sedimennya berupa lempung yang berada pada dinding anak sungai Sendang Klampok, Desa Ngebung. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Kolbe, et al (2011), bahwa warna gelap mencerminkan waktu tinggal yang lebih lama dan lingkungan yang berhubungan dengan geokimia sedimen dan air pori. Fosil ini ditemukan pada Formasi Pucangan, dimana Formasi ini dulunya identik dengan lingkungan rawa. Sementara fosil yang berwarna merah berdasarkan pengamatan visual hasil uji SEM menunjukkan ukuran partikel sebesar $\leq 11 \mu\text{m}$. Fosil yang berwarna merah memiliki sedimen pasir sedang yang berada pada Formasi Kabuh.

Berdasarkan penelitian Sujianto (2020) tentang analisis densitas, kekerasan, dan struktur kristal paduan Al-Ti, memperlihatkan hasil bahwa densitas mempengaruhi tingkat kekerasan bahan dengan hubungan linear positif. Semakin tinggi nilai densitas suatu kristal maka fosil tersebut semakin keras. Sehingga pada penelitian ini, kerapuhan suatu fosil dapat dilihat dari nilai densitasnya. Berdasarkan Tabel 3, yang mempunyai densitas paling tinggi sebesar 5,961 g/cm³ adalah struktur kristal Mn₃O₄ pada fosil berwarna hitam. Sementara yang memiliki densitas paling rendah sebesar 2,63 g/cm³ adalah struktur kristal wolfeite pada fosil warna merah. Hal tersebut menunjukkan bahwa fosil tersebut memiliki tingkat kekerasan yang rendah. Sehingga dapat dikatakan bahwa fosil warna hitam yang memiliki struktur kristal Mn₃O₄, memiliki tingkat kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan fosil warna merah.

Selain menggunakan densitas pada uji XRD, kerapuhan fosil dapat dilihat dari kepadatan kristal dari morfologi permukaannya pada uji SEM. Berdasarkan hasil yang diperoleh pada sampel fosil berwarna hitam dan merah, menunjukkan bahwa morfologi permukaan yang dimiliki tiap sampel berbeda-beda, seperti yang terdapat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Menurut Fansuri, et al. (2016), kerapatan dan kekerasan suatu material memiliki hubungan linier (berbanding lurus). Kekerasan didefinisikan sebagai ukuran ketahanan material terhadap deformasi (perubahan bentuk). Berdasarkan penelitian Issa, et al. (2020) struktur atom material menentukan kekerasan suatu material, material dengan struktur kristal cenderung lebih keras dibandingkan dengan material yang memiliki struktur amorf. Karena pada kristal memiliki struktur atom yang tersusun secara teratur dan berulang membentuk kisi kristal, sedangkan amorf memiliki struktur atom-atom yang cenderung acak dan tidak teratur. Nilai kekerasan material berbeda untuk setiap jenis material yang dipengaruhi oleh berbagai faktor intrinsik material tersebut, salah satunya densitas atom-atomnya. Material yang memiliki densitas atom yang tinggi dengan jarak antar atom semakin dekat maka ikatan antar partikel semakin kuat, menyebabkan material tersebut akan memiliki nilai kekerasan yang tinggi (Susilowati, S. E., 2016). Sehingga semakin tinggi densitas material dengan susunan atom-atomnya semakin rapat, maka akan memiliki nilai kekerasan semakin tinggi. Berdasarkan Gambar 5, fosil yang berwarna hitam memiliki morfologi dengan tingkat kerapatan yang cukup tinggi dan sedikit memiliki rongga atau pori. Sementara fosil yang berwarna merah pada Gambar 6, tingkat kerapatan antar partikel-partikel penyusunnya rendah dan memiliki rongga atau pori. Hal ini juga dipengaruhi oleh partikelnya yang berbentuk tabung memanjang diselimuti oleh partikel bulat. Perbedaan morfologi permukaan tersebut, dimungkinkan karena lingkungan pengendapannya yang berbeda-beda. Lingkungan pengendapan ini juga membuat fosil memiliki tingkat kerapatan yang berbeda pula.

Kristal dengan densitas tertinggi adalah Mn₃O₄ pada fosil berwarna hitam. Fosil warna merah memiliki densitas terendah pada kristal wolfeite. Sehingga fosil warna hitam memiliki tingkat kekerasan lebih tinggi dibandingkan fosil warna merah. Hasil analisis XRD tersebut dapat menjadi acuan dalam pengambilan tindakan konservasi yang diperlukan. Fosil yang mempunyai material lebih keras atau kuat dapat dilakukan tindakan konservasi ringan, seperti pembersihan kering dan konservasi sedang seperti pembersihan basah (Fadlilah, N., 2019). Alat yang digunakan adalah kuas, sikat, tatah dan menggunakan bahan seperti akuades, alkohol, serta larutan asam seperti air perasan jeruk nipis (bahan tradisional). Metode pembersihan tersebut bertujuan untuk melunturkan sisa-sisa polutan debu, sedimen tanah yang menutupi bentuk fosil, dan noda warna yang tidak dapat dibersihkan hanya dengan menggunakan metode pembersihan kering. Fosil yang mempunyai material lebih rapuh memerlukan penanganan konservasi yang tepat yaitu konsolidasi atau penguatan (Grant, T., 2007 dan Rodgers, 2004) menggunakan bahan paraloid B72 (Rosyidah, M.Y., et al., 2015) yang dilarutkan dalam pelarut, seperti xylene, aseton, toluena atau etil asetat (Hayati, N.N., et al., 2018). Metode konsolidasi ini bertujuan untuk meningkatkan ikatan antar mineral didalam fosil agar ketahanan fisiknya lebih baik sehingga fosil tidak mudah hancur.

5 Penutup

Fosil berwarna hitam memiliki sedimen berupa lempung yang berada pada Formasi Pucangan, dimana kandungan unsur kimia didominasi oleh Mn. Senyawa yang berkontribusi untuk memberikan warna hitam adalah $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ dan Mn_3O_4 . Fosil yang berwarna merah memiliki sedimen berupa pasir sedang yang berada pada Formasi Kabuh, dimana kandungan unsur kimianya didominasi oleh Fe, Ni, Ti, Zn. Senyawa yang berkontribusi untuk memberikan warna merah adalah traskite dan wolfeite ($\text{Fe}_2(\text{PO}_4)\text{OH}$). Berdasar analisis data di atas maka dapat direkomendasikan kegiatan penelitian lanjutan yang perlu dilaksanakan ke depan, yaitu mengenai pendekatan tafonomi pada fosil dan sedimen yang mengendapkannya.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi melalui Direktorat Jenderal Kebudayaan dibawah DIPA Tahun Anggaran 2022 pada Balai Pelestarian Situs Manusia Purba Sangiran Nomor: DIPA-023.1 5.427 843 /2022. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi melalui Direktorat Jenderal Kebudayaan, yang telah mendanai penelitian ini.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis tidak memiliki konflik kepentingan yang relevan dengan isi artikel ini.

Daftar Pustaka

Ainunnisa, R. R. 2013. "Variasi waktu perendaman dalam Simulated Body Fluid pada komposit Hidroksiapatit-Gelatin sebagai kandidat Bone Graft." Program Studi S1 Teknobiomedik, Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.

Anthony, J.W., Bideaux, R.A., Bladh, K.W., Nichols, M.C. Eds. 1990. *Handbook of Mineralogy*. Mineralogical Society of America, Chantilly, VA 20151-1110, USA. <http://www.handbookofmineralogy.org/>.

Borodin V.L., Lyutin V.I., Ilyukhin V.V., Belov N.V. 1979. "The Isomorphous Series Calcite - Otavite." *Doklady Akademii Nauk SSSR* 245: 1099-1101.

Brown, E.L., Dixon, R.A., Birkett, J.W. 2014. "The Discolouration of Human Teeth from Archaeological Contexts: Elemental Analysis of a Black Tooth from a Roman Cranium Recovered from the River Witham, Lincoln, UK." *Journal of Anthropology*. 2014: 1-7.

Cohen, D.R., Cohen, E.J., Graham, I.T., Soares, G.G., Hand, S.J., Archer, M. 2017. "Geochemical Exploration For Vertebrae Fossils Using Field Portable XRF." *Journal of Geochemical Exploration*. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.012>.

Encyclopaedia Britannica, Inc., 2020. "Fossil" *Britannica*, November 25. <https://www.britannica.com/science/fossil>.

Dumont, M., Zoeger, N., Streli, C., Wobrauschek, P., Falkenberg, G., Sander, P.M., Pyzalla, A.R. 2009. "Synchrotron XRF Analyses of Element Distribution in Fossilized Sauropod Dinosaur Bones." *Powder Diffraction* 24 (2): 130-134.

Fadlilah, N. 2019. "Identifikasi Kerusakan Fosil: Studi Kasus Koleksi Museum". *Jurnal Sangiran* 8:83-96.

Falini G., Fermani S., Gazzano M., Ripamonti A. 1998. "Structure And Morphology Of Synthetic Magnesium Calcite." *Journal of Materials Chemistry*. 8: 1061-1065.

Fansuri, H., Trengginas, T., Zulaicha, V., Utomo, W.P., Widiastuti, N., Purwanti, E. 2016. "Kerapatan, Kekerasan dan Koefisien Muai Panas Membran Penghantar Ion Oksigen $\text{LaCo}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ Tersubstitusi Ca^{2+} ($\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$)." *Reaktor* 16(2): 87-95.

Fernandez-Jalvo, Y., and Andrews, P. 2016. *Atlas of Taphonomic Identifications*. New York: Springer.

Grant, Tara. 2007. *Conservation of Wet Faunal Remains: Bone, Antler, and Ivory*. Canada: Canadian Conservation Institute.

Hatert, F. 2007. " $\text{Fe}^{II}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$, A Synthetic Analogue Of Wolfeite." *Acta Crystallographica Section C* 63: i119-i121.

Hayati, N.N., Fadlilah, N., Wahyuningsih, S. 2018. Variasi Pelarut Paraloid B-72 serta Karakterisasinya sebagai Bahan Konsolidan Fosil di BPSMP Sangiran. *Jurnal Sangiran* 7: 93-106.

Issa, H. K., Taherizadeh, A., & Maleki, A. 2020. Atomistic-level study of the mechanical behavior of amorphous and crystalline silica nanoparticles. *Ceramics International*, 46(13), 21647-21656. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.251>

Kolbe, S.E., Zambito, J.J., Brett, C.E., Wise, J.L., Wilson, R.D. 2011. "Brachiopod Shell Discoloration As An Indicator of Taphonomic Alteration In The Deep-Time Fossil Record." *PALAIOS* 26: 682-692.

López-González, F., Grandal-d'Anglade, A., Vidal-Romani, J.R., 2006. "Deciphering Bone Depositional Sequences In Caves Through The Study Of Manganese Coatings." *Journal of Archaeological Science* 33: 707-717.

Lyman, R.L. 1994. *Vertebrate Taphonomy*. Cambridge University Press.

Mcnamara, M.E. 2013. "The Taphonomy of Colour In Fossil Insects and Feathers." *Palaeontology* 1-19.

Merrill, L., Bassett, W.A. 2005. "Crystal Structure Of $\text{CaCO}_3(\text{II})$, A High-Pressure Metastable Phasecalcium Carbonate." *Acta Crystallographica B* 31: 343-349.

Montgelard, C., Buchy, M.C., Gautret, P., Dauphin, Y. 1997. "Biogeochemical Characterization Of Ichthyosaur Bones From Holzmaden (Germany, Lias)." *Bull. Soc. Geol. France* 168: 759-766.

Reiche, I., Favre-Quattropani, L., Vignaud, C., Bocherens, H., Charlet, L., Menu, M. 2003. "A Multi-Analytical Study Of Bone Diagenesis: The Neolithic Site Of Bercy (Paris, France)." *Meas. Sci. Technol* 14: 1608-1619.

Rodgers, B.A. 2004. *The Archaeologist's Manual for Conservation*. America: Kluwer Academic.

Rosyidah, M.Y., Lestari, P.P., Fadlilah, N., Istandibrata, Y.H. 2015. *Konservasi Fosil*. Sragen: Balai Pelestarian Situs Manusia Purba Sangiran.

Samuelson, D.A. 2007. *Textbook of Veterinary Histology*. Elsevier.

Stanienda-Pilecki, K.J. 2018. "Magnesium Calcite in Muschelkalk Limestones of The Polish Part of The Germanic Basin." *Carbonates and Evaporites* 33: 801-821.

Sujianto, S., Nasrun, M. 2020. "Analisis Densitas, Kekerasan, Dan Struktur Kristal Paduan Al-Ti Yang Dibuat Menggunakan Teknik Pemaduan Mekanik." *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi* 16(2): 244-248.

Sukhdev, A., Challa, M., Narayani, L., Manjunatha, A.S., Deepthi, P.R., Angadi, J.V., Kumar, P.M., Pasha, M. 2020. "Synthesis, Phase Transformation, And Morphology Of Hausmannite Mn_3O_4 Nanoparticles: Photocatalytic And Antibacterial Investigations." *Heliyon* 6: 1-18.

Susilowati, S. E. (2016). Pengaruh penambahan grafit terhadap kekerasan bantalan perunggu. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 1(2).

Van Bemmelen, R. W. 1949. *The geology of Indonesia*, Martinus Nijhoff, The Hague, 594–602.

Van Es, L. J. C. 1931. *The age of Pithecanthropus*, The Hague Martinus Nijhoff, Amsterdam.

Warr, L.N. 2021. "IMA-CNMNC Approved Mineral Symbols." *Mineralogical Magazine* 85(3): 291-320.

Biografi Penulis

Irma Fadhila Putri, lahir di Sukoharjo, 4 Desember 1994. Saat ini bertugas di Museum dan Cagar Budaya bidang Konservasi Koleksi, Kementerian Kebudayaan. Meraih gelar Sarjana Sains (S.Si) pada jurusan Kimia dari Universitas Sebelas Maret pada tahun 2016. Penulis telah menulis di beberapa jurnal ilmiah nasional yang terakreditasi maupun yang tidak terakreditasi.

Mohammad Wahyu Ristiawan, lahir di Jepara, 21 September 1995. Saat ini bertugas di Museum Islam Indonesia K.H. Hasyim Asy'ari, Museum dan Cagar Budaya, Kementerian Kebudayaan. Meraih gelar Sarjana Sains (S.Si) pada jurusan Fisika dari Universitas Diponegoro pada tahun 2017. Penulis telah menulis di beberapa jurnal ilmiah Internasional terindeks Scopus dan jurnal nasional yang terakreditasi maupun yang tidak terakreditasi.

Ernik Dwi Safitri, lahir di Jombang, 17 Maret 1994. Saat ini bertugas di Museum Manusia Purba Klaster Krikilan, Museum dan Cagar Budaya, Kementerian Kebudayaan dan sedang menempuh gelar Master di Departemen Fisika, Universitas Diponegoro. Meraih gelar Sarjana Sains (S.Si) pada jurusan Fisika dari Universitas Jember pada tahun 2017. Penulis telah menulis di beberapa jurnal ilmiah nasional yang terakreditasi maupun yang tidak terakreditasi.

M. Rais Fathoni, lahir di Sragen, 27 Mei 1990. Saat ini bertugas di Unit Situs Manusia Purba Sangiran, Museum dan Cagar Budaya, Kementerian Kebudayaan. Meraih gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada jurusan Teknik Geologi dari Universitas Diponegoro pada tahun 2012. Kemudian gelar Master Teknik (M.T.) dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2021. Penulis telah menulis di beberapa jurnal ilmiah nasional yang terakreditasi maupun yang tidak terakreditasi.

Khofif Duhari Rahmat, lahir di Yogyakarta, 13 Juli 1989. Saat ini bertugas di Museum Song Terus, Museum dan Cagar Budaya, Kementerian Kebudayaan. Meraih gelar Sarjana (S.S) pada jurusan Arkeologi dari Universitas Gajah Mada pada tahun 2012. Kemudian gelar Master Science (M.Sc) dari Universitas Gajah Mada pada tahun 2016. Penulis telah menulis di beberapa jurnal ilmiah nasional yang terakreditasi maupun yang tidak terakreditasi.

Suwita Nugraha, lahir di Klaten, 16 Oktober 1978. Saat ini bertugas di Unit Prambanan, Sewu, Sambisari, Museum dan Cagar Budaya, Kementerian Kebudayaan. Meraih gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada jurusan Teknik Geologi dari Universitas Gajah Mada pada tahun 2003. Kemudian gelar Master of Arts (M.A.) dari Universitas Gajah Mada pada tahun 2017. Penulis telah menulis di beberapa jurnal ilmiah nasional yang terakreditasi maupun yang tidak terakreditasi.

Sayekti Wahyuningsih, lahir di Klaten pada tahun 1971. Saat ini bertugas sebagai Guru Besar Bidang Ilmu Kimia Fotokatalis di Program Studi Kimia, Universitas Sebelas Maret. Aktif menulis di beberapa jurnal ilmiah nasional maupun internasional. Telah mempublikasikan 103 artikel terindeks Scopus dengan Scopus h-index 13.

