

DETEKSI DAN IDENTIFIKASI KAPANG PADA PROSES BIODETERIORASI BATUAN CANDI PAWON

DETECTION AND IDENTIFICATION OF MOLDS IN THE BIODETERIORATION PROCESS OF PAWON TEMPLE

Putri Nur Indahsari¹, Bernadetta Octavia¹, Nahar Cahyandaru²

¹Universitas Negeri Yogyakarta dan ²Balai Konservasi Borobudur
putrinur.207@student.uny.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keanekaragaman kapang yang ditemukan pada proses biodeteriorasi batuan Candi Pawon serta mengidentifikasi jenis kerusakan yang ditimbulkan oleh kapang pada proses biodeteriorasi batuan Candi Pawon. *Survey sampling* dilakukan pada batuan Candi Pawon berdasarkan syarat: lembab, lapuk, retak, dan terdapat kerak bewarna putih kekuningan. Pengambilan sampel secara *swab* menggunakan *cotton bud* steril dan secara kerik menggunakan *scalpel*. Inokulasi kapang menggunakan metode *streak* dan tabur pada medium *Czapek Dox Agar* (CDA), dilakukan inkubasi selama 4 sampai 7 hari koloni campuran kapang yang dipisahkan menjadi koloni murni, kemudian identifikasi kapang secara makroskopik dan mikroskopik dengan metode *profile matching* berdasarkan literatur. Hasil identifikasi ditemukan 6 (enam) genus kapang antara lain *Penicillium* (1,3%), *Paecilomyces* (59,4%), *Mucor* (15,9%), *Stachybotrys* (2,8%), *Aspergillus* (4,3%) dan *Cladosporium* (2,8%). Genus kapang pada Candi Pawon berdasarkan penelusuran pustaka dan jurnal berpotensi sebagai agen pembentukan warna, pengelupasan batuan dan pembentukan postule dan alveol.

Kata Kunci: Biodeteriorasi; Kapang; Batuan Candi; Candi Pawon

ABSTRACT

This research attempts to know the diversity of the molds which found in the biodeterioration process and identifying the type of damage caused by the molds in the biodeterioration process of Pawon Temple. The research begins on survey sampling based on the conditions: damp, weathered, cracked, and there is a yellowish-white crust. Sampling is done by swab technique using sterile cotton bud and scraping technique using scalpel. The mold inoculation using streak and sow method on Czapek Dox Agar (CDA) medium, the incubation was carried out for 4 to 7 days after that the mold was purified, Identification of macroscopic and microscopic mold with profile matching method based on the book *Pengenalan Kapang Tropik Umum*, Descriptions of Medical Fungi, Identification of Pathogenic Fungi. The result of the research shows that the identification could finds six genus are *Penicillium* (1.3%), *Paecilomyces* (59.4%), *Mucor* (15.9%), *Stachybotrys* (2.8%), *Aspergillus* (4.3%) and *Cladosporium* (2.8%). The genus of kalag in Pawon Temple is based on the search of libraries and journals potentially as agents of color formation, exfoliation of rocks and formation of postules and alveol.

Keywords: Biodeterioration; mould; temple stone; Candi Pawon

PENDAHULUAN

Candi Pawon merupakan salah satu contoh cagar budaya peninggalan sejarah yang berlokasi di Magelang, Jawa Tengah, Indonesia. Sebagai bangunan cagar budaya harus dilindungi dari kepunahan dan kerusakan akibat proses alam. Hal ini dikarenakan cagar budaya memiliki makna yang penting bagi pemahaman dan pengembangan sejarah, ilmu pengetahuan, dan kebudayaan, sehingga perlu dilindungi dan dilestarikan. Salah satu bentuk penjagaan yang telah dilakukan selama ini adalah dengan melakukan konservasi candi (Burford *et al.*, 2003).

Letak Candi Pawon yang berada pada lokasi terbuka, secara langsung mendapatkan paparan sinar matahari dan adanya perubahan suhu siang dan malam menimbulkan kerusakan pada batuan. Kerusakan yang ditimbulkan pada batuan Candi Pawon seperti pengelupasan, penggaraman, pertumbuhan organisme berlubang dan retak. Berdasarkan penyebabnya, pelapukan dibagi menjadi tiga yaitu pelapukan akibat proses fisika, kimia, dan biologi. Agen fisik, kimia, dan biologi bekerja bersama mulai dari sinergis hingga antagonis dan mengarah pada kerusakan (Gupta & Kavita, 2011). Di antara agen biologis, organisme sangat penting dalam kerusakan batu. Beberapa jenis organisme yang dapat menjadi penyebab kerusakan batuan diantaranya adalah bakteri, cyanobacteria, ragi, beberapa jenis alga dan jamur. Pada penelitian Habibi (2016) menurut De Felice *et al.*, 2010, mikroorganisme pada bangunan cagar budaya berpeluang menyebabkan terjadinya proses perubahan warna, pembentukan biofilm, biomineralisasi, dan degradasi material organik dan anorganik pada benda cagar budaya.

Kapang merupakan mikroganisme yang memainkan peran penting dalam kerusakan material batuan. Kapang batu dapat tumbuh pada permukaan batuan yang disebut (*epilith*) menembus pori-pori batuan disebut (*endolith*). Dalam batuan, kapang menggunakan pigmen yang menyebabkan perubahan warna dan juga menggunakan berbagai jenis asam organik seperti asam oksalat, asam glukonat dan asam laktat yang mengikat magnesium, mangan, besi dan ion kalsium dari permukaan batu (Mohammadi & Nasim, 2014). Dengan adanya kemampuan kapang dalam menyebabkan kerusakan batuan candi tersebut, maka perlu dilakukan identifikasi kapang pada batuan candi yang mengalami biodeteriorasi dengan tujuan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi berbagai kapang yang berperan pada proses biodeteriorasi batuan Candi Pawon.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2020–Januari 2021 di Laboratorium Balai Konservasi Borobudur. Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kualitatif dengan objek penelitian adalah kapang yang diisolasi dari batuan Candi Pawon dengan subjek penelitian meliputi seluruh kapang yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada batuan Candi Pawon. Teknik pengambilan sampel pada penelitian ini adalah *purposive sampling* dimana pengambilan sampel berdasarkan pada syarat dan kriteria tertentu. Kriteria yang digunakan dalam pengambilan sampel ini adalah kenampakan miselium, spora, bercak warna putih atau kekuningan dan kerusakan pada substrat. metode yang digunakan dalam melakukan pengambilan sampel adalah *non-destructive sampling* dengan teknik *swab* dan kerik. Metode *swab* dan kerik dilakukan dengan mengambil apusan batu yang memiliki bercak putih serta pada batuan yang lembab dan berlubang dengan *scalpel* dan *cotton bud* steril yang telah dibasahi sedikit dengan akuades.

Prosedur Penelitian

Prosedur yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah: pengambilan sampel pada batuan Candi Pawon yang memenuhi kriteria pengambilan sampel kemudian dilanjutkan dengan sterilisasi alat dan media, pembuatan media untuk pertumbuhan kapang, isolasi kapang, subkultur kapang serta karakterisasi kapang.

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data diperoleh dengan pengamatan kapang secara makroskopis dan mikroskopis disertai dengan identifikasi kapang. Pengamatan makroskopis pada isolat murni kapang meliputi warna berdasarkan pada standar warna *Faber Castell* (tekstur koloni, *radial furrow*, zonasi (ada/tidak), *growing zone* (ada/tidak), *exudate drop* dan warna sebalik koloni (Roisah, 2017). Pengamatan mikroskopis dilakukan dengan melakukan pengamatan kapang dengan mikroskop cahaya dimulai dengan perbesaran 40X sampai 1000X. Dalam pengamatan mikroskopis ini yang perlu diamati antara lain spora (seksual/aseksual), konidia (bentuk, ukuran), hifa (septum, ukuran), konidiofor (permukaan dinding, ukuran), vesikula (bentuk, ukuran), metula dan fialid (Roisah, 2017). Hasil pengamatan kemudian diidentifikasi dengan menggunakan metode *profile matching* yaitu dengan membandingkan hasil pengamatan karakter fenotip makroskopis dan mikroskopis kapang dengan beberapa buku sebagai rujukan untuk ilustrasi dan definisi digunakan referensi buku Pengenalan Kapang Tropik Umum (Gandjar, 2000), *Descriptions of Medical Fungi* (Kidd *et al.*, 2016), *Fungi: Identification* (Richard, 1997) serta penelitian terkait.

Teknik Analisis Data

Data hasil karakterisasi kemudian diidentifikasi hingga tingkatan genus dan dibahas secara deskriptif sesuai denganciri-ciri berdasarkan buku rujukan identifikasi dan analisis deskriptif mengenai peranan kapang yang telah diisolasi pada proses biodeteriorasi batuan Candi Pawon.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Isolasi dan Karakterisasi Kapang pada Batuan Candi Pawon

Pengambilan sampel kapang pada batuan Candi Pawon dilakukan dengan cara *purposive sampling* yaitu dengan mengambil sampel berdasarkan pertimbangan tertentu, diantaranya adalah kenampakan miselium, spora, bercak warna dan kerusakan pada substrat (Sugiyono, 2013). Oleh karena itu berdasarkan metode tersebut peneliti kemudian melakukan seleksi dan pengambilan sampel pada beberapa titik yang ada pada Candi Pawon yang diketahui mengalami kerusakan sesuai dengan syarat yang telah ditentukan. Kondisi kerusakan pada batuan Candi Pawon dapat dilihat pada Gambar 1.

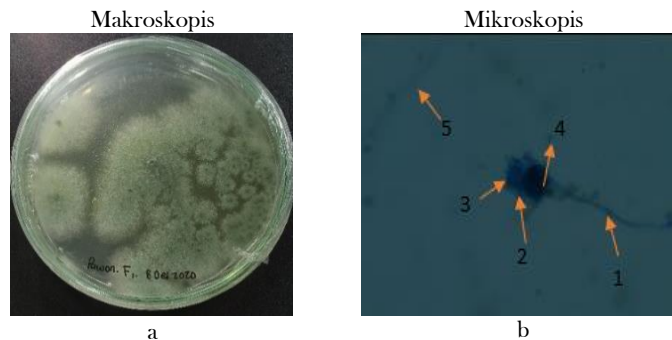


Gambar 1. Bagian dinding batuan Candi Pawon yang akan diisolasi

Pengambilan sampel di Candi Pawon ini menggunakan metode *non-destructive sampling* dengan teknik *swabbing* dan kerik. Metode *swab* dilakukan dengan cara mengambil apusan batu yang memenuhi syarat dengan menggunakan *cotton swab* steril. Metode kerik dilakukan dengan menggunakan *scalpel*. Selanjutnya sampel yang diperoleh kemudian dibawa ke Laboratorium Balai Konservasi Borobudur untuk kemudian diisolasi pada media *Czapek Dox Agar* (CDA) secara aseptis. Pemilihan CDA sebagai medium pertumbuhan isolat kapang karena diketahui bahwa media ini berperan dalam mendukung pertumbuhan

miselium dan sporulasi yang baik (Gupta, 2014). Berdasarkan hasil isolasi, diketahui bahwa total isolat yang ditemukan adalah 69 isolat. Berdasarkan identifikasi dan karakterisasi yang dilakukan secara konvensional berdasarkan pengamatan makroskopik dan mikroskopik pada kapang. Hasil karakterisasi kemudian dilakukan identifikasi dengan metode *profile matching* berdasarkan buku Pengenalan Kapang Tropik Umum, *Descriptions of Medical Fungi, Identification of Pathogenic Fungi*. Berdasarkan hasil identifikasi dan karakterisasi diketahui terdapat 6 genus kapang kontaminan yaitu *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Mucor*, *Aspergillus*, *Stachybotrys*, dan *Cladosporium*.

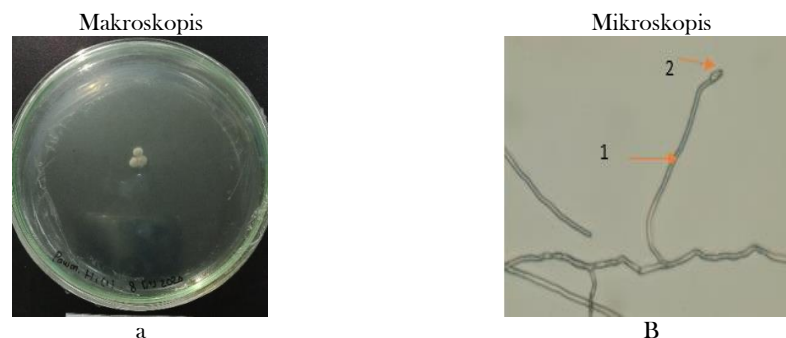
a. *Aspergillus*



Gambar 2. a) Pengamatan makroskopis isolat kapang *Aspergillus* (b) Pengamatan dengan perbesaran 1000X pewarnaan *lactophenol cotton blue*. 1. Konidiofor, 2. Fialid, 3. Konidia, 4. Vesikula, 5. hifa, 6. Metula.

Setelah dilakukan inkubasi selama 7 hari, berdasarkan pengamatan makroskopis *Aspergillus* memiliki memiliki koloni yang biasanya tumbuh cepat dengan warna putih, kuning, kuning kecokelatan, coklat sampai hitam atau nuansa hijau. Hal ini didukung oleh teori yang disampaikan oleh Dwidjoseputro (2010) dalam (Lovelyana, 2018) pada saat muda miselium *Aspergillus* berwarna putih, kemudian akan bersporulasi menjadi warna coklat kekuning-kuningan, hijau atau kehitam-hitaman tergantung spesiesnya. Berdasar hasil pengamatan mikroskopis, genus ini menunjukkan adanya konidiofor yang sebagian besar tegak dan padat. Terdapat vesikula yang besar pada ujung konidiofor, metula mengelilingi permukaan vakuola dan terdapat fialid yang tumbuh dari struktur metula. *Aspergillus* memiliki konidiofor yang berwarna hialin hingga coklat, berdinding tebal dan halus. Kepala konidia berwarna hitam, berbentuk bulat, dan cenderung merekah menjadi kolom-kolom saat berumur tua. Konidia berbentuk bulat hingga semi bulat, berwarna hitam atau coklat (Gandjar *et al.*, 1999).

b. *Cladosporium*

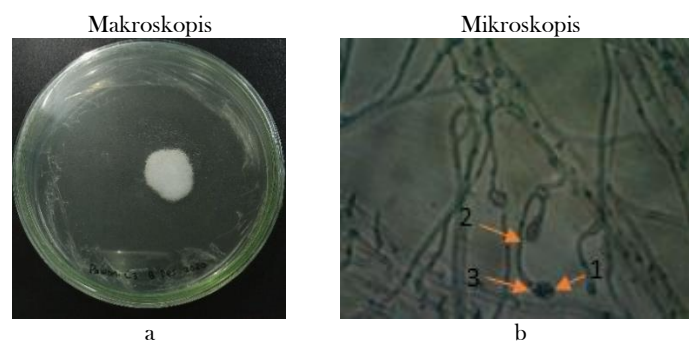


Gambar 3. a) Pengamatan makroskopis isolat kapang *Cladosporium* (b) Pengamatan dengan perbesaran 1000X pewarnaan *lactophenol cotton blue*. 1. Konidiofor, 2. Konidia.

Berdasarkan pengamatan makroskopis yang dilakukan setelah 7 hari masa inkubasi karakter makroskopik isolat memiliki penampakan koloni seperti beludru. Warna koloni

hijau keabu-abuan dan warna sebalik koloni hijau kehitaman. Tekstur permukaan dari koloni ini yaitu granul dengan diameter 10 mm. Pertumbuhan isolat ini tidak terdapat garis-garis radial (*Radial Furrow*) dan zonasi, tetapi memiliki titik air (*Excudate Drops*) dan zona pertumbuhan (*Growing zone*). Berdasarkan deskripsi di atas merujuk pada (Gandjar *et al.*, 1999), (Campbell *et al.*, 2013) dan (Kidd *et al.*, 2016) dapat dilihat pada Tabel 1 bahwa, koloni genus *Cladosporium* memiliki penampakan mula-mula seperti beludru kemudian seperti tepung karena memiliki konidia yang lebat. Koloni berwarna hijau tua kecokelatan atau hijau keabu-abuan dengan warna sebalik koloni hijau kehitaman. Pada hasil pengamatan mikroskopis menunjukkan adanya konidiofor dan konida. Bentuk dari konidiofor tegak, lurus, tidak bercabang atau bercabang hanya di apikal. Konidia berantai dengan struktur halus dan memiliki hilus gelap yang berbeda. Konidia yang paling dekat dengan konidiofor dan tempat rantai bercabang biasanya berbentuk perisai. Di pangkal konidia berbentuk oval atau perisai dengan panjang 15 μm dan sering bersepta (Campbell *et al.*, 2013).

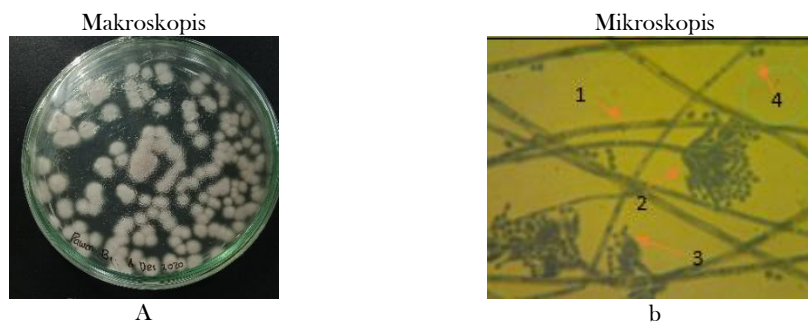
c. *Mucor*



Gambar 4. a) Pengamatan makroskopis isolat kapang *Mucor* (b) Pengamatan dengan perbesaran 1000X pewarnaan *lactophenol cotton blue*. 1. Sporangium, 2. Sporangiofor, 3. Kolumela, 4. Khlamidospora.

Hasil pengamatan morfologi makroskopik yang dilakukan pada isolat kapang yang sudah diinkubasi selama 7 hari menunjukkan miselium berwarna putih serta memiliki warna sebalik putih kekuningan dengan tekstur granul dengan diameter 20 mm serta memiliki zonasi. Genus *Mucor* memiliki koloni yang tumbuh sangat cepat, seperti kapas hingga halus dengan warna isolat putih menjadi kuning, menjadi abu-abu tua dan dengan perkembangan sporangia. Sporangiofor tegak, sederhana atau bercabang dengan membentuk diameter 60-300 μm . Sporangiofor biasanya berbentuk *globose* hingga bulat (Kidd *et al.*, 2016). Pada pengamatan mikroskopiknya memiliki sporangiofor, sporangium dan hifa yang tidak bersepta. Warna hialin ditandai isolat dapat terwarnai dengan *pewarna lactophenol cotton blue*. Sporangia berdiameter sampai 80 μm . Kolumela dapat berbentuk obvoid, elips, atau silindris-elips dengan diameter 37-55 μm . Banyak terdapat khlamidospora dalam sporangiofor dan bisa dalam kolumela (Gandjar, 1999). *Mucor* merupakan kosmopolit yang mudah diisolasi dari tanah dan kacang-kacangan. Memiliki suhu pertumbuhan optimum pada suhu 5 °-25 °C dan suhu maksimum 30 °C (Gandjar *et al.*, 1999)

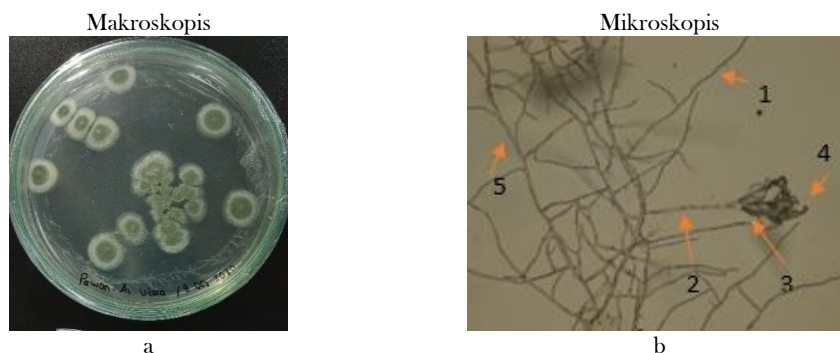
d. *Paecilomyces*



Gambar 5 a) Pengamatan makroskopos isolat kapang *Paecilomyces*, (b) Pengamatan dengan perbesaran 1000X pewarnaan lactophenol cotton blue. 1.Konidiofor, 2.metula, 3.fialid, 4. Konidia

Berdasarkan pengamatan makroskopis, koloni *Paecilomyces* memperlihatkan warna merah lembayung dan sebaliknya tidak bewarna atau agak merah lembayung. Memiliki tekstur granul dan sedikit kasar dengan diameter 15 mm, memiliki *excudate drops* dan *growing zone*. Menurut (Gandjar *et al.*, 1999), koloni dapat bewarna merah lembayung redup dengan sebalik koloni tidak bewarna atau agak merah lembayung. Dalam pengamatan mikroskopis terlihat konidiofor yang lurus, konidia berantai, adanya metula dan fialid yang tebal. Konidiofor bisa bewarna kuning hingga ungu dengan berdinding kasar yang membawa kluster metula dan fialid yang lebat. Konidia pada genus ini berbentuk elips hingga fusiform dengan dinding halus dan terkadang sedikit kasar. Konidia berbentuk ellipsoidal dengan ukuran (2,5 - 3) x 2 µm. Konidiofor terkadang tumbuh tidak teratur dengan kepala bercabang berakhir fialid yang meruncing. Beberapa fialid berada disepanjang sisi hifa (Campbell *et al.*, 2013).

e. *Penicillium*

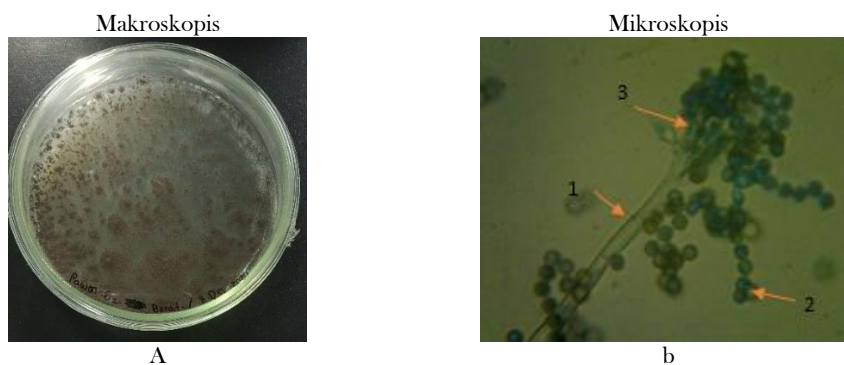


Gambar 6. a) Pengamatan makroskopos isolat kapang *Penicillium* (b) Pengamatan dengan perbesaran 1000X pewarnaan *lactophenol cotton blue*. 1.Hifa, 2. Konidiofor, 3. Fialid, 4. Percabangan.

Berdasarkan hasil pengamatan makroskopis, genus ini menunjukkan bahwa memiliki konidia halus berwarna hijau kekuningan. Hal ini sesuai dengan teori Menurut (Kidd *et al.*, 2016) bahwa *Penicillium* dapat tumbuh lebih cepat pada suhu 25 °C dengan tekstur halus konidia hijau kekuningan, namun dapat tumbuh sampai suhu 37 °C dengan koloni kasar berkabut dengan warna kecokelatan mirip ragi. Hasil pengamatan karakter secara mikroskopik memperlihatkan alat reproduksi aseksual (konidia), fialid, metula, konidiofor dan hifa. *Penicillium* diklasifikasikan dalam Filum Ascomycota. Menurut Samson, *et al.*, (2004) dalam Suherman (2012), kapang *Penicillium* memiliki konidia bersel tunggal berbentuk oval dan tersusun seperti rantai yang memanjang. Konidia yang dihasilkan oleh fialid berbentuk seperti labu dengan bagian ujung yang menyempit. Fialid berasal dari suatu struktur yang disebut metula. Metula pada *Penicillium* dapat bercabang atau tidak

bercabang. Konidiofor memiliki warna hialin dengan permukaan dinding sel halus atau kasar (Gandjar, 1999).

f. *Stachybotrys*



Gambar 7. Hiasan yoni I Brongsongan
(Sumber: Balai Konservasi Borobudur, 2017)

Berdasarkan pengamatan makroskopis yang telah dilakukan terlihat pada permukaan isolat berwarna hitam dengan tekstur seperti tepung, memiliki titik air (*excudate drops*) dan zonasi pada koloni. Koloni dapat berwarna putih hingga abu-abu kehitaman. Ada yang mengenal bahwa kapang ini merupakan jamur hitam atau jamur beracun karena memiliki kemampuan menghasilkan beberapa mikotoksin yang cukup kuat dan berhubungan dengan kerusakan pada air dalam jangka panjang. Spesies ini banyak ditemukan dalam tanah dan bangunan yang berbasis selulosa. Pertumbuhan optimal genus ini yaitu pada 25° - 30°C (Wang *et al.*, 2015). pengamatan mikroskopis menunjukkan adanya konidiofor, fialid dan konidia. *Stachybotrys* dicirikan oleh makronematosia, konidiofor mononematosia, tunggal atau bercabang, dengan sel konidiogenus fialid yang berbeda, dan konidia 0-septat, diproduksi dalam massa berlendir dan biasanya berwarna gelap (Wang *et al.*, 2015).

Keanekaragaman dan Persebaran Kapang pada Batuan Candi Pawon

Tabel 1. Persebaran dan Persentase Genus Kapang

No.	Genus	Jumlah isolat	Titik pengambilan sampel								Persentase
			A	B	C	D	E	F	G	H	
1	<i>Aspergillus</i>	3						*		*	4,3%
2	<i>Cladosporium</i>	2								*	2,8%
3	<i>Mucor</i>	11		*	*					*	15,9%
4	<i>Paecilomyces</i>	41	*	*	*				*	*	59,4%
5	<i>Penicillium</i>	9	*		*		*				13%
6	<i>Stachybotrys</i>	2								*	2,8%

Berdasarkan tabel persebaran dan persentase genus kapang diatas, dominasi paling tinggi yaitu pada genus *Paecilomyces* yang dapat ditemukan pada titik 5 titik dari total 8 titik pengambilan sampel dengan presentase 59,4%. Jika dibandingkan dengan persentase genus yang lain, *Paecilomyces* menempati posisi tertinggi dalam persebarannya. Pada saat pengambilan sampel, diketahui bahwa suhu batuan tempat pengambilan sampel pada batuan Candi Pawon adalah 25°-27°C. berdasar Gandjar *et al.*, (1999) beberapa spesies dari genus *Paecilomyces* memiliki suhu pertumbuhan optimum 26°-30°C dan ada yang bersifat termofil sehingga dapat tumbuh pada suhu 50°C (60°C). Hal ini menunjukkan bahwa batuan Candi

Pawon memiliki kondisi lingkungan yang optimum untuk pertumbuhan genus *Paecilomyces*. Genus kapang yang menempati persebaran terbanyak kedua adalah genus *Cladosporium* dengan persentase persebaran 15,9%. Selanjutnya genus *Penicillium* menempati dominasi ketiga dengan persentase persebarannya 13%. Selanjutnya genus *Aspergillus* menempati dominasi keempat dengan persentase persebaran 4,3%. Terakhir adalah genus *Mucor* dan *Stachybotrys* dengan persentase persebaran 2,8%. Adanya pertumbuhan kapang pada batuan Candi Pawon dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah adanya kemampuan kapang dalam metabolismenya yang dapat menghasilkan asam anorganik dan asam organik. Adanya asam tersebut menyebabkan adanya pelarutan mineral dan perubahan struktur batuan, hal ini menimbulkan perubahan warna pada batuan (Farooq *et al.*, 2015).

Biodeteriorasi Batuan Candi Pawon

Letak Candi Pawon yang berada pada lokasi terbuka, secara langsung mendapatkan paparan sinar matahari dan adanya perubahan suhu siang dan malam menimbulkan kerusakan pada batuan. Kerusakan yang ditimbulkan pada batuan Candi Pawon seperti pengelupasan, penggaraman, pertumbuhan organisme berlubang dan retak. Berdasarkan penyebabnya, pelapukan dibagi menjadi tiga yaitu pelapukan akibat proses fisika, kimia, dan biologi. Agen fisik, kimia, dan biologi bekerja bersama mulai dari sinergis hingga antagonis dan mengarah pada kerusakan (Gupta & Kavita, 2011). Di antara agen biologis, organisme sangat penting dalam kerusakan batu. Beberapa jenis organisme yang dapat menjadi penyebab kerusakan batuan diantaranya adalah bakteri, cyanobacteria, ragi, beberapa jenis alga dan jamur. Pada penelitian Habibi (2016) menurut De Felice *et al.*, 2010, mikroorganisme pada bangunan cagar budaya berpeluang menyebabkan terjadinya proses perubahan warna, pembentukan biofilm, biomineralisasi, dan degradasi material organik dan inorganik pada benda cagar budaya

Mikroorganisme yang berada di batuan memainkan banyak proses biogeokimia yang dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan yang sangat beragam. Lingkungan yang beragam dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti: suhu, kelembaban, intensitas cahaya, karbon organik dan oksigen. Berbagai jenis organisme dapat tumbuh dengan memanfaatkan komponen mineral dari batuan dan endapan. Batuan yang memiliki struktur lapuk dan memiliki kelembaban yang tinggi merupakan tempat yang mudah ditumbuhi organisme. Pada penelitian Habibi pada tahun 2016 bahwa pelapukan pada cagar budaya yang menyebabkan berkurangnya estetika cagar budaya disebabkan oleh biodeteriogen baik itu bakteri, kapang, algae, lichene, maupun lumut. Dengan adanya berbagai permasalahan tersebut, kerusakan yang disebabkan oleh aktivitas organisme pada khususnya kapang akan dibahas lebih lanjut. Menurut De Felice *et al.*, (2010) dalam Habibi (2016) kapang yang berkoloni di batuan candi berpeluang menyebabkan proses perubahan warna, pembentukan biofilm, degradasi material organik dan inorganik pada benda cagar budaya yang merupakan tanda biodeteriorasi pada batuan candi. Mekanisme yang terjadi yaitu adanya produksi asam dan basa, perubahan komponen permukaan, penyerapan panas, peningkatan retensi air, dan penetrasi ke dalam struktur batuan secara langsung.

Berdasarkan deteksi dan identifikasi yang telah dilakukan, beberapa jenis kapang yang dapat teridentifikasi diantaranya adalah *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Mucor*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, dan *Stachybotrys*. Menurut Farooq *et al.*, (2016) bahwa banyak spesies kapang yang diisolasi dari monument batu seperti *Alternaria*, *Aspergillus*, *Acremonium*, *Arthobotrys*, *Auerobasidium*, *Cladosporium*, *Curvularia*, *Fusarium*, *Helminthosporium*, *Mucor*, *Foma*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Trichothecium* dan *Thrichoderma*. Beberapa genus tersebut menunjukkan penyebab pewarnaan dan kerusakan struktural material pada monument batu. *Penicillium frequentans* memiliki kemampuan dalam pembentukan biofilm hitam pada permukaan monumen batu. Biofilm bisa disebabkan adanya interaksi hifa kapang dan substrat batu. *Aspergillus sydowi* dan

Stachybotrys arta memberikan dampak noda hitam pada monument batu. Pada penemuan kapang hitam seperti *Foma* dan *Alternaria* memiliki kemampuan sebagai agen pembusuk pada marmer dan monumen batu. Diperkuat dengan penelitian (Farooq *et al.*, 2015) beberapa kapang yang memproduksi asam organik yang akan memberikan efek korosif pada batuan yang sesuai dengan penelitian ini yaitu *Penicillium*, *Aspergillus*, *Mucor* dan *Cladosporium*. Pada penelitiannya, *Penicillium* termasuk dalam memproduksi asam tinggi, yang diproduksi yaitu berupa asam oksalat, asam sitrat, asam fumarat dan asam asetat. *Aspergillus* dan *Mucor* juga termasuk dalam kapang yang dapat memproduksi asam tinggi yaitu dapat memproduksi asam oksalat, asam sitrat, asam glukonat, asam fumarat dan asam suksinat. *Cladosporium* termasuk kapang yang memproduksi asam yang rendah karena hanya memproduksi asam oksalat dan asam sitrat.

Dari asam organik yang diproduksi, akan menunjukkan mekanisme pembentukan warna dan noda pada batuan candi. Menurut (Sterilnegr, 2000) pada penelitian (Mcnamara & Ralph, 2005) menunjukkan *Aspergillus niger*, *Penicillium simplissimum* dan *Scopulariopsis brevicaulis* sebagai kapang penting yang dapat menyerang batu mengandung silika yang dapat menghasilkan lubang dengan diameter hingga 2 cm pada permukaan. Hal tersebut sesuai dengan struktur Candi Pawon yang dominan silika. Kapang *Aspergillus* dan *Penicillium* juga termasuk kapang yang teridentifikasi dari batuan Candi Pawon. Dari beberapa pernyataan tersebut, kapang hasil identifikasi pada batuan Candi Pawon terbukti memiliki kemampuan dalam pelapukan batu. Oleh karena itu memungkinkan dari hasil identifikasi kapang yang dilakukan menyebabkan biodeteriorasi pada batuan Candi Pawon.

Proses biodeteriorasi pada batuan candi sangat dipengaruhi oleh keadaan yang terjadi pada batuan. Kondisi pada batuan dari bagian dalam (bilik) maupun luar ruangan sangat bervariasi. Terutama pada Candi Pawon yang memiliki letak di lingkungan terbuka tanpa ada naungan. Oleh karena itu akan memiliki nutrisi, suhu dan kelembaban yang berbeda. Menurut (Gaylarde *et al.*, 2006) dalam (Hons, 2018) paparan sinar matahari pada permukaan yang terbuka merupakan faktor yang menentukan komposisi dan ekologi pada pertumbuhan mikroba terutama pada kapang. Permukaan batu akan terus menerus terpapar degradasi fisik, kimiawi, dan biologis. Agen fisik, kimiawi dan biologis akan terus bekerja sama. Namun diantara agen tersebut, agen biologis yaitu mikroorganisme terutama kapang yang memiliki peran penting dalam kerusakan batu. Koloni kapang pada batu akan bergantung faktor lingkungan seperti ketersediaan air, pH, paparan iklim, sumber nutrisi. Kondisi batu juga akan mengalami perubahan sesuai dengan lingkungan terutama suhu dan kelembaban, karena akan memberikan respon pada komunitas mikro terutama kapang yang sedang berkembang May, (2003) dalam (Milca & Jelena, (2009).

Pada bulan Januari tercatat rentang suhu Candi Pawon yaitu tercatat pada rentang suhu 25° - 27° C dengan rata-rata suhu 25,12° C, kelembaban tercatat pada rentang 87%-100% dengan rata-rata kelembaban relatif 99,54%. Pada bulan Februari, tercatat pada rentang suhu 25° C- 26° C dengan rata-rata suhu 25,25° C, kelembaban tercatat pada rentang 96% - 100% dengan rata-rata kelembaban relatif 99,85%. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi batuan Candi Pawon berdasarkan suhu dan kelembaban relatif masih tinggi sehingga memungkinkan untuk pertumbuhan dan perkembangbiakan kapang. Apabila kondisi batuan semakin lembab maka akan menjadi ideal bagi kapang untuk berkembang biak dan akan mengancam kelestarian batuan Candi Pawon.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Mcnamara & Ralph, (2005), perlindungan pada batuan bersejarah bisa dilakukan dengan mencegah pengendapan yang terjadi pada permukaan batu dengan menggunakan konsolidan polimer yaitu polimer organik misalnya metil metakrilat suatu bahan kimia yang dapat menembus dibagian bawah permukaan batu kemudian akan mengikat batu yang rusak menjadi satu. Selain itu bisa melakukan pengobatan antimikroba pada batu dengan memanfaatkan sumber hayati yang memiliki kandungan antimikroba.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian serta pembahasan maka dapat disimpulkan bahwa jumlah isolat kapang yang ditemukan yaitu 69 isolat, dari isolat tersebut didapat 6 genus: *Penicillium* (13%), *Paecilomyces* (59,4%), *Mucor* (15,9%), *Stachybotrys* (2,8%), *Aspergillus* (4,3%), *Cladosporium* (2,8%).

Batuan Candi Pawon yang telah dilakukan survei sampling menunjukkan terjadinya proses biodeteriorasi. Berdasarkan penelusuran pustaka dan jurnal bahwa kapang pada batuan Candi Pawon berpotensi sebagai agen biodeteriorasi dalam hal pembentukan warna, pengelupasan batuan dan pembentukan postule dan alevol.

SARAN/REKOMENDASI

1. Diperlukan penelitian lanjut mengenai identifikasi molekuler dan uji aktivitas enzim terhadap kapang yang ditemukan sehingga dapat menjelaskan lebih detail mengenai proses biodeteriorasi pada batuan candi.
2. Perlu dilakukan tindakan lanjutan mengenai permasalahan konservasi pada batuan Candi Pawon seperti retakan batu candi, pengelupasan, penggaraman dan kebocoran pada bagian atap agar dapat teratasi masalah kelembaban pada batuan.
3. Perlu dilakukan penelitian lanjut mengenai penghambatan mikroba khususnya kapang yang terdapat di batuan candi agar tetap terjaga konservasinya.
4. Pemberian papan informasi dan peraturan bagi pengunjung agar pengunjung tetap terkondisikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada Wiwit Kasiyati, S.S, M.A., Kepala Balai Konservasi Borobudur yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan kegiatan penelitian di situs Candi Pawon.

DAFTAR PUSTAKA

- Buford, J. (2003). *Management Extention*. Alabama: ACES Press.
- Campbell, C.K., Elizabeth, M.J, David, W.W. (2013). *Identification of Pathogenic Fungi*. London: Public Health Laboratory Service.
- Farooq, M., Hasan, M., Gull, F. (2015). Kerusakan Mikobial Dari Monumen Batu Dharmarajika. *Jurnal Mikrobiologi & Eksperimen*. Taxila. 2 (1): 29 - 33.
- Fauziyyah, N.A. & Putri, D.A.S. (2016). Isolasi Jamur dari Batuan Penutup Drainase Pada Sisi Selatan Lantai II Bidang H Candi Borobudur. *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, Vol.10 (2). 40-44. Bandung: ITB.
- Gandjar, I., Robert, A.S., Karim, V.T.V., Ariyani, O., Imam, S. (1999). *Pengenalan Kapang Tropik Umum*. Depok: Universitas Indonesia.
- Gandjar, I. (2006). *Mikologi Dasar dan Terapan*. Jakarta: Yayasan Pustaka Obor Indonesia.
- Gupta, S.P. dan Kavita, S. (2011). Biodeterioration And Preservation of Sita Devi Temple, Deorbija, Chhattisgarh, India. *Jurnal Internasional*, Volume 2 Issue 2 89-94. India: Archaeological Survey.

- Habibi, M. (2016). Identifikasi Biodeteriogen Sebagai Langkah Awal Konservasi Benda Cagar Budaya. *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, Vol 10 No 2. Magelang: Balai Konservasi Borobudur.
- Haldoko, L. A., Muhammad, R. & Al. (2014). Karakteristik Batu Penyusun Candi Borobudur. *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, Vol.8 (1). 38-47. Magelang: Balai Konservasi Borobudur.
- Hafsan. (2011). *Mikrobiologi Umum*. Makassar: Alauddin University Press.
- Hons. (2008). *Microbial Biodeterioration Of Outdoor Stone Monuments. Assessment Methods and ontrol Strategis*. Thesis. Cardiff University.
- Kidd, S. Halliday, C. Alexioul, H dan Ellis, D. (2016). *Descriptions of Medical Fungi*, Third Edition. Australia: University of Adelaide.
- Lestari, D.P. & Eram, T.P. (2018). Lingkungan Fisik Yang Mempengaruhi Keberadaan Kapang *Aspergillus* Dalam Ruang Perpustakaan. *Higeia*.2(3). *Jurnal Lingkungan Fisik*. Sema rang: Fakultas Ilmu Keolahragaan.
- Maulana, S. (2014). Identifikasi Jamur *Mucor* Pada Serundeng Yang Dijual Diwilayah Kecamatan Mojokerto Kota Kediri Dengan Metode Semai. *Karya Tulis Ilmiah*. Kediri: Bhakti Wiyata.
- Mohammadi, P. & Nasim, M.B. (2014). Isolation and molecular identification of deteriorating fungi from Cyrus the Great tomb stones. *Iranial Journal of Microbiology*, Vol. 6. No 5. Iran; Faculty of Biological Sciences.
- Mcnamara, C.J.& Ralph, M. (2005). Microbial Deterioration of Historic Stone. *Front Ecol Environ*. The Ecological Society of America. 3(8):445-451.
- Pinky, P.T., Proborini, M.W., Nuhantoro, Irsan. (2015). Pengaruh Media Terhadap Pertumbuhan dan Biomassa Cendawan *Alternaria alternat* (Fries) Keissler. *Jurnal Biologi*. Vol, 19. No.1, Hal:30-33.
- Riadi, Imam. (2020). Deteksi dan Identifikasi Kapang Pada Proses Biodeteriorasi Arsip Foto Memory of The World (MOW) Restorasi Candi Borobudur. Skripsi. Yogyakarta: FMIPA.
- Roisah, M.K. (2017). Isolasi, Karakterisasi, dan Identifikasi Kapang Kontaminan pada Kultur in Vitro Bambu *Dendrocalamus asper*, *Gigantochloa apus* dan *Schizostachyum iraten* di PT Bambu Nusa Verde Tebenon, Harjobinangun, Pakem, Sleman. Skripsi. Yogyakarta: FMIPA UNY.
- Roosheroe, I.G. & Wellyzar, S. (2014). *Mikologi: Dasar dan Terapan*. Jakarta: Yayasan Pustaka Obor Indonesia.

- Salvadori, O. & Municchia, A. C. (2016). The Role of Fungi and Lichens in The Biodeterioration Of Stone Monuments. The Open Conference Proceeding Journal, Vol.7. Italy: Universitas Roma Tre.
- Sedyawati, E., Hariani, S., Hasan, D., Ratnaesih, M., Wiwin, D.S.R., Chaidir, A. (2013). Candi Indonesia. Plublished: Pelestarian Cagar Budaya dan Kemuseumn.
- Sugiyono. (2013). Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta.
- Suherman, E.A. (2010). Isolasi, Identifikasi dan Pengujian Kemampuan Kapang Selulolitik Dari Manuskrip Kuno Kertas Daluang Asal Keraton Kasepuhan Cirebon. Skripsi. Depok: FMIPA UI.
- Soekmono. (1973). Borobudur Bukan Candi Volume 5. Santo Saba Pilang.
- Tiano, P. (2016). Conference Proceedings Journal. Biodeterioration of Stone Monuments a Worldwide Issue Vol 7. Italy: Institute for the Conservation and the Valorization of Cultural Heritage.
- Tukidjan, B.A., Muhsidi & Santosa, P. (2007). Tinjauan Korelasi Teknis-Arkeologis Candi Borobudur, Pawon, Mendut, dan Ngawen. Magelang: Balai Konservasi Borobudur.
- Tim Penyusun Laporan Akhir Candi Pawon. (2013). Laporan Akhir Rencana Pelestarian Candi Pawon. Magelang: Balai Konservasi Borobudur.
- Trimaryanto, A. (2019). Candi-candi Bersejarah Di Indonesia. Gamping Sleman: Sentra Edukasi Media.
- Wang, Y. Eric, M. Kevin, D.H. and De, W.L. (2015). Overview of Stachybotrys (Memnoniella) and Cureent Species Status. Article in Fungal Diversity. School of Science. DOI 10.1007/s13225-014-0319-0.