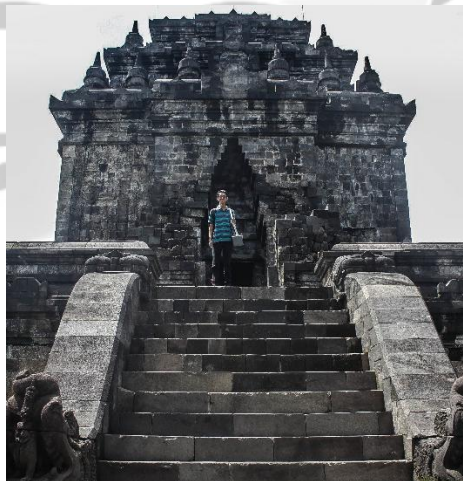


II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Gambaran Umum Candi Mendut

Candi Mendut merupakan tempat ibadah bagi pemeluk agama Buddha. Candi Mendut dibangun pada tahun 824 Masehi oleh pemerintahan Raja Indra dari dinasti Syailendra. Letak Candi Mendut berada di Jalan Mayor Kusen, Kota Mungkid, Kabupaten Magelang, Jawa Tengah (Wirasanti dkk., 2015).

Candi Mendut memiliki bahan bangunan berupa batu bata yang ditutupi dengan batu alam yaitu batuan andesit. Pintu masuk bangunan Candi Mendut menghadap ke arah barat daya. Candi Mendut memiliki tiga tingkat atap yang dihiasi dengan stupa kecil. Tinggi bangunan Candi Mendut adalah 26,4 meter (Wirasanti dkk., 2015).



Gambar 1. Candi Mendut tampak depan

Candi Mendut dihiasi dengan ukiran makhluk kayangan dan pada tepi tangga dihiasi dengan relief cerita Pancatantra dan Jataka. Bagian induk Candi Mendut terdapat tiga arca Buddha yaitu arca Dhyani Buddha Wairocana, arca Awalokiteswara dan arca Wajrapāni (Wirasanti dkk., 2015).

Batu anding Candi Mendut dapat mengalami pelapukan secara fisika, kimia, dan biologi. Pelapukan secara fisika terjadi karena adanya faktor fisik seperti suhu dan tekanan. Pelapukan secara kimia terjadi karena struktur kimiawi pada batuan berubah karena reaksi hidrolisis atau oksidasi. Pelapukan secara biologis terjadi karena aktivitas organisme seperti jamur, alga, dan bakteri (Riyanto, 2014).

Batu andesit merupakan batuan penyusun Candi Mendut yang keberadaannya sangat melimpah di Pulau Jawa. Batu andesit terbentuk dari magma yang membeku ketika mencapai puncak gunung. Batu andesit penyusun candi memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda antar batuan, sehingga kerusakan dan pelapukannya akan berbeda tiap batuan andesit (Harjanto, 2011). Penelitian tentang pelapukan di Candi Mendut belum pernah dilakukan sehingga belum diketahui pasti penyebab pelapukan pada batuan Candi Mendut. Komposisi kimiawi batuan andesit dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Persentase Senyawa Andesit dalam Satuan Gram

Senyawa	Komposisi (%)
SiO ₂	47,55
Al ₂ O ₃	18,37
Fe ₂ O ₃	8,19
CaO	7,11
MgO	2,25
Na ₂ O	1,70
K ₂ O	2,16
TiO ₂	0,59
MnO	0,22
P ₂ O ₅	0,30

H ₂ O	0,52
------------------	------

(Sumber: Harjanto, 2011)

B. Bakteri Batu Candi

Bakteri merupakan organisme mikro paling banyak tersebar dan memiliki keanekaragaman yang tinggi. Beberapa bakteri dapat bertahan di lingkungan yang sangat ekstrem, seperti dalam lava panas yang bersuhu di atas 300 °C atau dalam es kutub dengan suhu di bawah 0 °C (Reece dkk., 2011). Ciri yang paling mudah dikenali dari bakteri adalah prokariotik dan umumnya uniseluler (Tortora dkk., 2007). Sel bakteri dikenal mempunyai tiga bentuk yang berbeda, diantaranya kokus (bulat), basil (silindris atau batang), dan spiral (Volk dan Wheeler, 1988).

Bakteri hidup berkoloni atau pun soliter dan membelah diri untuk berkembang biak atau memperbanyak diri. Habitatnya juga bervariasi, ada yang hidup di air, tanah, batuan, udara, bahkan dalam tubuh hewan seperti di usus manusia. Bakteri ada yang hidup dengan oksigen disebut bakteri aerob dan tanpa oksigen disebut anaerob. Beberapa bakteri ada yang hidup tanpa oksigen, namun bila ada oksigen maka metabolisme berubah menjadi aerob yang biasa disebut aerob fakultatif (Betsy dan Keogh, 2005).

Menurut Pelczar dan Chan (2008), bakteri dapat dibagi menjadi empat kelompok dalam hal respon terhadap oksigen, yaitu:

1. Aerobik merupakan bakteri yang memerlukan oksigen bebas untuk hidupnya. Bakteri akan mati tanpa adanya oksigen. Bakteri kelompok aerob akan mengurai glukosa atau zat organik lain seperti etanol untuk dioksidasi menjadi karbon dioksida, air, dan energi.
2. Anaerobik merupakan organisme yang tidak tumbuh bahkan mati bila ada oksigen. Contoh bakteri anaerob yaitu *Clostridium tetani* dan *Clostridium botulinum*.
3. Bakteri kelompok anaerob fakultatif dapat hidup dengan oksigen ataupun tanpa oksigen, namun kebanyakan lebih memilih hidup dengan oksigen. Contoh bakteri anaerob fakultatif antara lain *Escherichia coli* dan *Aerobacter aerogenes*.
4. Mikroaerofilik adalah bakteri yang hidup optimal pada kondisi sedikit oksigen. Contoh mikroaerofil adalah *Helicobacter pylori* mengakibatkan tukak lambung serta *Borrelia burgdorferi*.

Menurut Madigan dkk (2009), *biofilm* berasal dari bakteri yang hidup bebas melekat pada permukaan batuan kemudian memperbanyak diri dan membentuk suatu lapisan *biofilm*. Bakteri yang membentuk *biofilm* akan menghasilkan *Extracellular Polymeric Substances* (EPS) yang akan melekatkan pada permukaan batuan. Dampak dari pembentukan *biofilm* pada batuan yaitu terdapat perubahan warna dan perubahan struktur yang disebut dengan *Biopatina* (Krumbein, 2003). Perubahan warna dan struktur batuan karena ada reaksi redoks yang dapat mengubah struktur kristal pada mineral batuan (Puente dkk., 2006).

Menurut Harbowo (2011), warna pada permukaan batuan dapat mengalami perubahan karena adanya pigmen dari mikroorganisme yang telah mati di permukaan batuan. Warna pada batuan akan berbeda karena setiap pigmen memiliki penampilan warna tertentu. Mikroorganisme ketika mati akan meninggalkan pigmen warna di permukaan batuan tersebut yang akan membentuk lapisan kerak.

Aktivitas mikroorganisme dapat mengubah komposisi batuan karena reaksi metabolit sekunder dan sisa metabolisme yang dihasilkan mikroorganisme pada batuan. Batuan andesit mengandung mineral yang digunakan dalam proses biosintesis seperti besi, kalsium dan fosfat dalam formasi oksida di alam (Harbowo, 2011). Unsur tersebut dapat diekstraksi dengan menghasilkan senyawa biosintetik yang mengionisasi unsur tersebut lalu diserap sel. Perubahan komposisi dapat menyebabkan pengkristaran pada batuan dan garam tersebut dapat terkikis oleh air. Perubahan permukaan batuan yang terjadi adalah terbentuknya cekung karena aktivitas mikroorganisme (Harbowo, 2011).

C. Karakterisasi Bakteri

Menurut Pelczar dan Chan (2008), karakterisasi bakteri dominan merupakan kegiatan untuk mengamati hasil isolat. Kegiatan ini dapat dilakukan dengan melihat sifat sitologi, sifat morfologi, dan sifat fisiologi. Sifat sitologi mencakup bentuk sel, motilitas, dan sifat Gram. Sifat morfologi mencakup sifat kolonisasi seperti ukuran, bentuk, tepian dan warna.

Koloni yang memenuhi standar pengamatan berjumlah 30 hingga 300 koloni dalam satu cawan petri (Dwyana dan Gobel, 2011). Bakteri dominan dapat ditentukan dengan melihat bakteri paling sering muncul pada tiap sampel yang ada (Siqueira dan Rocas, 2008). Sifat fisiologi mencakup uji katalase, uji fermentasi karbohidrat, dan uji reduksi nitrat.

Pengamatan bakteri lebih sering dilakukan dalam keadaan bakteri telah terwarnai karena zat pewarna mempermudah melihat struktur bakteri seperti bentuk yang akan dipelajari. Selain itu, zat kimia ini juga dapat mengungkapkan ukuran, bentuk, susunan sel, struktur internal (misalnya spora), dan juga senyawa kimia yang membentuk bakteri tersebut. Pengamatan bakteri yang telah diwarnai biasanya dilihat dengan bantuan mikroskop (Volk dan Wheeler, 1988). Pada uji kemurnian dilakukan pengamatan morfologi koloni, uji fermentasi karbohidrat, uji katalase, uji motilitas dan pengecatan Gram. Pengamatan morfologi koloni meliputi bentuk, tepi, elevasi dan warna koloni (Yulvizardkk., 2015).

Menurut Muchtadi dan Ayustaningwarno (2010), fermentasi merupakan proses menghasilkan energi dengan cara merombak senyawa organik. Fermentasi yang dilakukan mikroba merupakan proses pengubahan senyawa makromolekul organik menjadi senyawa yang lebih sederhana oleh aktivitas dalam kondisi anaerob. Fermentasi karbohidrat menghasilkan senyawa akhir seperti asam laktat dan propionat, ester-ester, keton, dan gas (Pelczar dan Chan, 2008).

Menurut Volk dan Wheeler (1988), uji fermentasi karbohidrat digunakan untuk melihat perubahan warna indikator merah di medium glukosa menjadi kuning karena adanya fermentasi glukosa yang dilakukan oleh bakteri. Fermentasi karbohidrat juga menghasilkan gas yang dapat dilihat dengan melihat gelembung udara pada tabung Durham yang diletakkan terbalik di dalam tabung medium glukosa. Reaksi fermentasi gula yang terjadi:

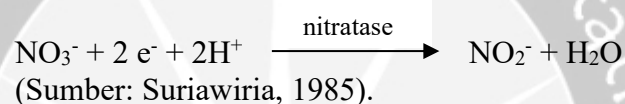


Interval transisi pH indikator *phenol red* pada medium berkisar antara pH 6,4 (kuning) dan pH 8,2 (merah). Jika larutan awalnya berwarna kuning, warna merah akan muncul pertama kali pada pH 8,2 dan semakin mendominasi seiring dengan kenaikan pH. Sebaliknya, jika larutan awalnya berwarna merah, warna kuning akan muncul pertama kali pada pH 6,4 dan semakin mendominasi seiring dengan penurunan pH (Bishop, 1972).

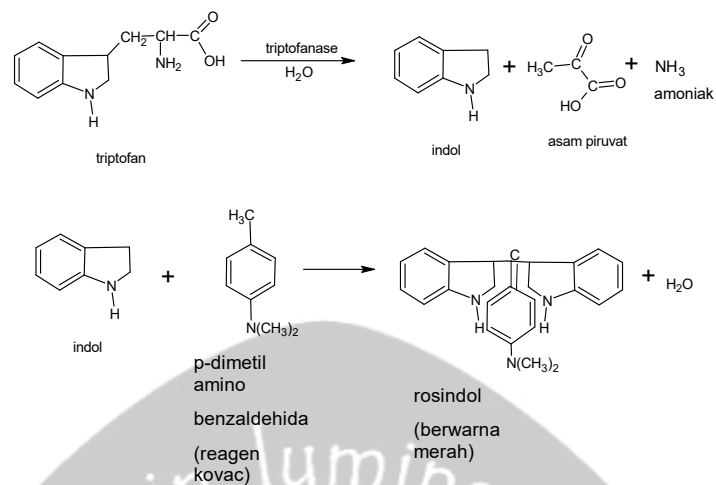
Menurut Fardiaz (2007), uji reduksi nitrat digunakan untuk melihat kemampuan bakteri untuk mereduksi nitrat menjadi nitrit ditandai dengan terbentuknya warna merah setelah ditambahkan reagen uji. Reagen uji yang mengandung asam sulfanilat dan α -naftilamin akan bereaksi dengan nitrit yang menyebabkan perubahan warna dari kuning menjadi merah. Bila tidak terjadi perubahan warna ditambahkan Zn yang dapat mereduksi nitrat menjadi nitrit dan

nitritakan bereaksi dengan asam sulfanilat dan α -naftilamin. Karena adanya nitrat akan membuat warna pada medium menjadi berwarna merah (Lay, 1994).

Reduksi nitrat banyak terjadi pada bakterianaerob fakultatif. Oksigen dapat menghambat reduksi nitrat, sehingga umumnya oksigen dihabiskan terlebih dahulu dalam reaksinya (Lay, 1994; Suriawiria, 1985). Reduksi nitrat terjadi pada kebanyakan bakterianaerob fakultatif dengan menghasilkan nitrit dengan reaksi yang terjadi:



Uji pembuatan indol dilakukan untuk mengetahui kemampuan bakteri yang diuji untuk membentuk indol dari triptofan sebagai aktivitas enzim triptofanase yang dimilikinya. Asam amino triptofan umumnya terdapat pada protein sebagai komponen asam amino, sehingga mudah digunakan oleh mikroorganisme. Reagen Kovac atau Erlich yang mengandung p-dimetilbenzaldehid akan bereaksi dengan medium membentuk cincin indol berwarna merah, (Volk dan Wheeler, 1988; Lay, 1994). Mekanisme reaksi yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Reaksi pembentukan indol (Sumber: Lay, 1994).

Indol dan asam piruvat terbentuk dari hasil hidrolisis asam amino triptofan oleh enzim triptofanase akan bereaksi dengan Reagen Kovac atau Erlich sehingga membentuk cincin indol berwarna merah (Lay, 1994).

Uji

katalase bertujuan untuk mengetahui jenis bakteri berdasarkan kebutuhannya. Ada tidaknya pembentukan enzim katalase dapat membedakan kelompok-kelompok bakteri tertentu. Bakteri yang dapat menghancurkan hidrogen peroksida (H₂O₂) karena menghasilkan enzim katalase (Hadioetomo, 1990). Sebagian besar bakteri menggunakan oksigen dari H₂O₂ yang bersifat racun bagi sistem enzim, namun bakteri tersebut tetap dapat bertahan hidup karena bakteri memproduksi enzim katalase yang dapat mengubah H₂O₂ menjadi O₂ dan H₂O (Volk dan Wheeler, 1988).

Pewarnaan Gram pada bakteri digunakan untuk melihat sifat sitologi. Menurut Cappucino dan Sherman (2011), prinsip pengecatan

gram adalah melihat kemampuan dinding sel terhadap zat warna dasaryaitu kristal violet setelah pencucian alkohol 96%. Bakteri Gram positif dindingnya akan terlihat berwarna ungu karena Kristal violet terikat lebih kuat pada dinding selnya, sedangkan kristal violet pada dinding sel bakteri Gram negatif mudah larut saat pencucian alkohol karena pada sel Gram negatif pori-pori mudah membesar karena kandungan lipidnya banyak sehingga saat pencucian alkohol 96% warna akan larut.

D. Hipotesis

Karakteristik umum bakteri pada dinding Candi Mendut yaitu sel bakteri Gram negatif, berbentuk batang, dan memiliki flagel.