

Pengaruh Aplikasi Bioarang dan Zeolit pada Fluks CO₂, Populasi Mikrob, dan Aktivitas Enzim Mikrob pada Gambut

(The Effect of Biochar and Zeolite Application on CO₂ Flux, Microbial Population, and Microbial Enzymatic Activity on Peat)

Safira Eka Aprianti^{1*}, Rahayu Widyastuti², Heru Bagus Pulunggono², Laksmita Prima Santi³

(Diterima Juli 2022/Disetujui Januari 2023)

ABSTRAK

Lahan gambut yang dijadikan perkebunan kelapa sawit dianggap berkontribusi dalam pelepasan CO₂ ke atmosfer sebagai salah satu gas penyebab pemanasan global. Tambahan amelioran berupa bioarang dan zeolit berpotensi menyerap CO₂ dari respirasi tanah pada lahan gambut karena memiliki pori molekuler. Penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi amelioran pada fluks CO₂, kadar air, populasi mikrob, dan aktivitas enzim mikrob pada gambut. Amelioran diaplikasikan pada gambut dengan 2 faktor, faktor pertama ialah kombinasi amelioran dengan 6 taraf perlakuan: kontrol (A0); zeolit (A1); bioarang (A2); zeolite:bioarang (75:25); zeolit:bioarang (25:75); zeolit:bioarang (50:50), dan faktor kedua ialah 3 taraf dosis perlakuan (% b/b): 1,5%; 3%; dan 4,5%. Fluks CO₂ dan kadar air gambut diukur setiap bulan selama 4 bulan di laboratorium. Hasilnya menunjukkan bahwa zeolit tanpa campuran bioarang (A1) mampu menekan fluks CO₂ dan menekan penurunan kadar air lebih baik dibandingkan dengan kombinasi amelioran lainnya, tetapi persentase dosis amelioran yang berbeda tidak memperlihatkan perbedaan nyata. Aplikasi amelioran dan inkubasi memengaruhi populasi mikrob dan aktivitas enzim, dan hasilnya beragam. Sifat kimia berubah setelah 4 bulan inkubasi. Kesimpulannya, percobaan ini mengindikasikan bahwa hanya amandemen zeolit yang dapat menekan emisi CO₂ dan kadar air tetapi tidak memengaruhi dinamika populasi mikrob dan aktivitas enzim.

Kata kunci: aktivitas enzim, amelioran, fluks CO₂, gambut, mikrob lignoselulolitik

ABSTRACT

Oil palm plantation on peatlands is considered to contribute to increasing global warming by releasing CO₂ as one of the greenhouse gases that cause global warming. The addition of ameliorants, such as biochar and zeolite, can absorb CO₂ from soil respiration and store and filter it in their molecular pores. This research aimed to study the effect of ameliorant application on the CO₂ flux, water content, microbial population, and enzyme activities. Ameliorant was applied to peat soil with two factors. The first factor was an ameliorant combination with 6 treatment levels: control (A0); zeolite (A1); biochar (A2); zeolite:biochar 75:25; zeolite:biochar 25:75; zeolite:biochar 50:50, and the second factor was 3 levels dose of treatment (% w/w): 1.5%, 3%, and 4.5%. Peat flux CO₂ and water content were measured monthly for four months in the laboratory. Without mixing with biochar (A1), the results showed that zeolite suppressed CO₂ flux and suppressed the decrease of water content better than other ameliorant combinations. However, different ameliorant dosage percentages did not show any significant results. Ameliorant application and incubation affected the microbial population and enzyme activities, and the results were varied. Chemical characteristics changed after 4 months of incubation. In conclusion, our results indicate that only zeolite amendment can suppress CO₂ flux and decrease water content but did not affect microbial population dynamics and enzyme activities.

Keywords: ameliorant, CO₂ flux, enzyme activities, lignocellulolytic microbes, peat

PENDAHULUAN

Lahan gambut merupakan ekosistem yang penting dalam fungsi ekologi maupun ekonomi karena meru-

pakan habitat flora dan fauna, menyimpan cadangan karbon, dan menyediakan baik hasil hutan maupun perkebunan yang bermanfaat bagi perekonomian masyarakat. Lahan gambut yang dibuka dengan pengeringan lahan untuk dijadikan perkebunan kelapa sawit merupakan salah satu masalah yang sering ditemui dalam praktik pengelolaan lahan gambut. Hal ini diduga dapat menyebabkan tingginya emisi CO₂ yang lepas ke atmosfer.

Respirasi akar (respirasi autotrof), dekomposisi gambut (respirasi heterotrof dan dekomposisi serasah), dan emisi karbon yang terlarut dalam air (*dissolved organic carbon*) berkontribusi dalam

¹ Program Studi Bioteknologi Tanah dan Lingkungan, Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

² Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

³ Pusat Penelitian Bioteknologi dan Bioindustri Indonesia (PPBI), Jl. Taman Kencana No. 1, Bogor 16128

* Penulis Korespondensi: Email: safiraeka@gmail.com

dinamika pelepasan CO₂ ke atmosfer pada lahan gambut (Melling *et al.* 2013). Emisi CO₂ dari respirasi akar dinetralkan melalui proses fotosintesis, sedangkan aktivitas dekomposisi gambut memengaruhi peningkatan pelepasan gas rumah kaca (Agus *et al.* 2010; Hergoualc'h & Verchot 2013). Dalam dekomposisi gambut, bahan organik dirombak oleh mikroba lignoselulolitik karena bahan gambut memiliki lignoselulosa yang tinggi. Bahan lignoselulosa adalah bahan yang terdiri atas lignin, hemiselulosa, dan selulosa. Bakteri, aktinomisetes, dan jamur diketahui memiliki aktivitas lignoselulolitik karena enzim lignoselulolitik dapat menguraikan bahan lignoselulosa (Widiastuti *et al.* 2015; Choirunnisa *et al.* 2017). Aktivitas mikroba dalam mengurai bahan organik umumnya mengacu pada CO₂ yang dihasilkan oleh semua organisme tanah dan melepaskannya ke atmosfer.

Upaya untuk menekan lepasnya CO₂ ke atmosfer pada lahan gambut adalah dengan menambahkan material penyaring molekul (*molecular sieve material*) yang berupa bioarang dan zeolit. Zeolit disebut sebagai penyaring molekul karena memiliki pori molekuler dan luas permukaan yang besar sehingga dapat menyaring molekul (Sugiarto *et al.* 2013). Zeolit banyak digunakan dalam industri sebagai penyerap dan menghilangkan berbagai molekul yang tidak diinginkan. Beberapa penelitian terdahulu menyebutkan zeolit mampu memurnikan biogas dari CO₂ sebanyak 18,70%; kemampuannya tersebut dipengaruhi oleh jenis zeolit, ukuran bahan, partikel, ukuran pori, jumlah zeolit, serta bentuk dan ukuran kolom (Apriyanti, 2012). Bioarang sebagai penyaring molekul juga berpotensi menjerap CO₂. Pengurangan emisi CO₂ tanah karena tambahan bioarang juga dilaporkan karena berkurangnya aktivitas enzimatik dan mengendapnya CO₂ pada permukaan bioarang, dan karena sifatnya yang rekalsitran maka dapat memperlambat laju pengembalian karbon (C) ke atmosfer (Woolf *et al.* 2010; Case *et al.* 2014).

Kebutuhan kelapa sawit secara nasional dan global diperkirakan akan meningkat di masa depan karena meningkatnya jumlah penduduk dan majunya industri. Penting untuk memastikan bahwa pengelolaan perkebunan kelapa sawit di lahan gambut yang dikeringkan tidak menyebabkan emisi CO₂ lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh zeolit dan bioarang pada emisi CO₂, populasi mikroba, dan aktivitas enzimatiknya, pada lahan gambut yang ditanami kelapa sawit.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari–Oktober 2021. Sampel bahan gambut dikumpulkan dari perkebunan kelapa sawit Kecamatan Koto Gasib, Kabupaten Siak, Provinsi Riau, Sumatera. Lokasi penelitian secara geografis berada di titik koordinat 0° 44' 44" N 101° 46' 22" B.

Pengambilan Sampel Gambut

Sampel diambil pada perkebunan kelapa sawit di lahan gambut pada plot pertanaman kelapa sawit yang berumur 15 tahun. Sampel gambut diambil pada bagian permukaan tanah dengan kedalaman 0–20 cm di bawah tegakan sawit. Selanjutnya sampel ditempatkan di dalam wadah plastik dan disimpan dalam *cool box* dan dibawa ke laboratorium untuk pengamatan awal total populasi mikroba. Sebagian sampel ditempatkan dalam karung sebagai bahan untuk inkubasi dan pengukuran CO₂ di laboratorium.

Penyiapan Inkubasi Pengukuran CO₂

Sampel dari lapangan dipisahkan dari material kayu berukuran besar yang ada di dalam sampel agar bahan homogen, ditimbang sampai bobot 2 kg, lalu dimasukkan ke dalam toples berukuran 5 L.

Aplikasi amelioran yang digunakan merupakan kombinasi zeolit dan bioarang (zeolit:bioarang) dengan beragam taraf dosis (% b/b). Amelioran yang digunakan adalah: A0 (kontrol/tanpa amelioran), A1D1 (zeolit 1,5%), A1D2 (zeolit 3%), A1D3 (zeolit 4,5%), A2D1 (bioarang 1,5%), A2D2 (bioarang 3%), A2D3 (bioarang 4,5%), A3D1 (zeolit:bioarang 75:25, 1,5%), A3D2 (zeolit:bioarang 75:25, 3%), A3D3 (zeolit:bioarang 75:25, 4,5%), A4D1 (zeolit:bioarang 25:75, 1,5%), A4D2 (zeolit:bioarang 25:75, 3%), A4D3 (zeolit:bioarang 25:75, 4,5%), A5D1 (zeolit:bioarang 50:50, 1,5%), A5D2 (zeolit:bioarang 50:50, 3%), A5D3 (zeolit:bioarang 50:50, 4,5%). Setiap perlakuan diulang 3 kali sehingga terdapat 54 unit perlakuan. Sampel di dalam toples kemudian ditambah amelioran zeolit dan bioarang pada permukaan gambut sesuai dengan dosis perlakuan, dan kemudian diberi label. Sampel diinkubasi di laboratorium selama 4 bulan.

Analisis Gambut di Lokasi Penelitian

Parameter gambut di lokasi penelitian dianalisis ialah bobot isi, kadar air, pH, C-organik, kadar abu, N-total, lignin, dan selulosa (Tabel 1).

Pengamatan Emisi CO₂

Emisi CO₂ diukur pada pagi hari setiap bulan selama 4 bulan menggunakan *Infrared Gas Analyzer* Li-COR 830 (Gambar 1). Pada saat pengukuran CO₂, sampel di dalam toples yang telah diaplikasikan amelioran kemudian ditutup dengan tutup kedap udara yang dilubangi dan dihubungkan dengan selang ke alat. Alat dipasang pada setiap toples dan emisi CO₂ diukur selama ± 3 menit per toples. Pembacaan pengukuran menggunakan peranti yang terhubung pada laptop. Perhitungan fluks CO₂ menggunakan rumus Madsen *et al.* (2009):

$$F_c = \frac{V}{A} \frac{P_0}{R (T_0 + 273.15)} \frac{dC}{dT}$$

Keterangan:

F_c = Flux CO₂ ($\mu\text{mol}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

V = Volume wadah (m^3)

A = Luas wadah (m^2)

Tabel 1 Analisis gambut awal

Parameter	Metode
Bobot isi (g/cm ³)	Ring sampel
Kadar air (%)	Gravimetri (Oven 105 °C)
pH	pH meter
C-organik (%)	Walkey & Black
Kadar abu (%)	Pengabuan
N-Total (%)	Kjedhal
Lignin dan selulosa	Van Soest (1985)



Gambar 1 Pengukuran CO₂ gambut dalam toples menggunakan *Infrared Gas Analyzer* Li-COR 830.

$$P_0 = \text{Tekanan atmosfer awal}$$

$$R = \text{Konstanta gas (8,314 Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1})$$

$$T_0 = \text{Suhu udara dalam toples inkubasi}$$

$$\frac{dC}{dT} = \text{Perubahan konsentrasi CO}_2 \text{ per unit waktu}$$

$$(\text{mol ppm m}^{-2} \text{ sec}^{-1})$$

Pengamatan Total Populasi Mikrob, Fungi, Bakteri Selulolitik, dan Fungi Lignolitik

Total populasi mikrob, fungi, bakteri selulolitik, dan fungi lignolitik diamati pada awal dan pada bulan keempat inkubasi. Mikrob diisolasi dengan menimbang 10 g bahan gambut, kemudian dimasukkan pada 90 mL larutan fisiologis (0,85% NaCl), dikocok menggunakan *shaker*. Pengenceran dilakukan pada tingkat pengenceran 10⁻⁴, 10⁻⁵, dan 10⁻⁶, dan disebar pada media *nutrient agar* (NA) untuk menumbuhkan mikrob, dan *potato dextrose agar* (PDA) untuk menumbuhkan fungi. Sampel diinkubasi selama 2 × 24 jam pada suhu ruang sehingga dapat dihitung populasinya dengan menggunakan *colony counter* (Gambar 2).

Isolasi Bakteri Selulolitik dan Fungi Lignolitik

Bakteri selulolitik diisolasi pada medium selektif yang mengandung karboksimetil selulosa (CMC) 1% (10 g CMC; 0,01 g FeSO₄; 1 g KH₂PO₄; 0,5 g K₂SO₄; 0,01 g MnSO₄; 0,5 g NaCl; 1 g NH₄NO₃; 20 g agar-agar). Isolat yang tumbuh pada media CMC dimurnikan dan dilanjutkan pada diuji kemampuan degradasi selulosa. Kemampuan degradasi selulosa diuji secara kuantitatif dengan menuangkan merah kongo 0,1%, kemudian dидiamkan selama 15 menit dan dibilas

dengan NaCl 1 M. Isolat yang bernilai positif mampu mendegradasi selulosa ditunjukkan dengan terbentuknya zona bening di sekeliling koloni bakteri (Yusnia *et al.* 2019). Adapun fungi lignolitik diisolasi pada medium padat selektif PDA (39 g L⁻¹) yang diperkaya dengan 0,05% guaiakol. Isolat fungi yang menunjukkan aktivitas lignolitik positif ditandai dengan pembentukan zona warna merah kecokelatan di sekitar koloni. Hal tersebut mengindikasikan bahwa koloni tersebut mampu mendegradasi lignin dengan substrat guaiakol (Sharma *et al.* 2017).

Ekstraksi Enzim Lignoselulolitik

Enzim lignolitik diekstraksi dengan membiakkan isolat fungi pada media ligninase cair pada suhu ruang selama 7 hari. Suspensi jamur disentrifugasi dengan kecepatan 10000 rpm (suhu 4°C, 15 menit). Suspensi berupa ekstrak kasar digunakan untuk pengukuran aktivitas lignolitik secara kuantitatif (Jaya *et al.* 2015).

Enzim selulolitik diekstraksi dengan mengambil 1 ose isolat bakteri selulolitik dari media CMC yang diinokulasikan ke 25 mL CMC cair, selanjutnya diinkubasi pada suhu ruang dan dikocok dengan kecepatan 120 rpm selama 24 jam. Sebanyak 10 mL sampel diinokulasikan ke dalam 100 mL media cair CMC dan diinkubasi selama 24 jam. Produksi enzim diukur dengan mengambil 5 mL kultur ke dalam *valcon*, disentrifugasi dengan kecepatan 6000 rpm selama 10 menit, dan supernatan yang diperoleh merupakan enzim ekstrak kasar (Murtiyaningsih & Hazmi 2017).

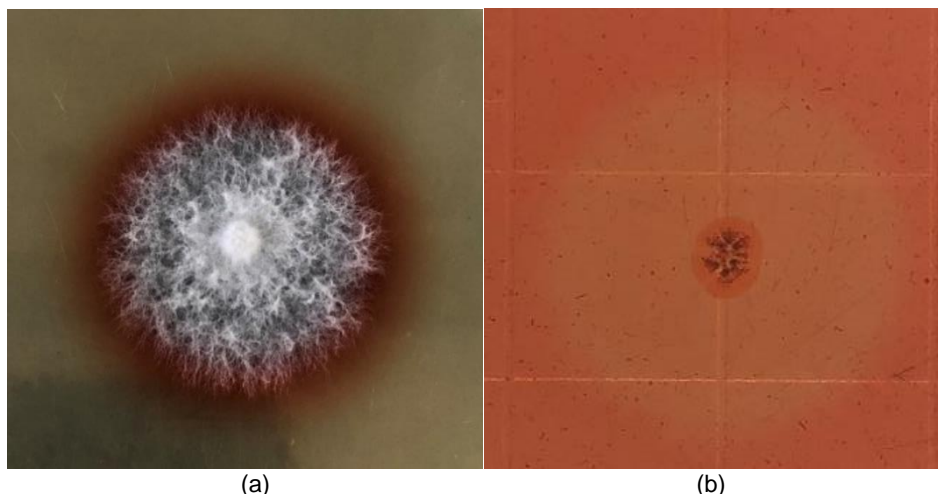
Analisis Aktivitas Enzim

• Uji aktivitas lakase

Sebanyak 0,2 mL ekstrak enzim lakase ditambahkan 20 mL larutan peyangga fosfat 0,2 M, kemudian disentrifugasi dengan kecepatan 5000 rpm pada suhu 4°C selama 10 menit. Filtrat sebanyak 1,2 mL diambil kemudian ditambahkan 0,3 mL larutan bufer asetat 1,5 M (pH 5,0) dan 1 mL ABTS (asam 2,2- azino-bis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfonat). Campuran selanjutnya dihomogenkan dengan vorteks dan diinkubasi selama 30 menit pada suhu ruang dan diukur pada λ 420 nm (Eichlerova *et al.* 2012).

• Uji Aktivitas lignin peroksidase (Li-P)

Ekstrak enzim sebanyak 0,2 mL ditambahkan ke dalam 2,8 mL larutan bufer tartrat (pH 2.5). Ke dalam campuran tersebut ditambahkan veratril alkohol 2 mM dan H₂O₂ 0,4 mM masing-masing sebanyak 1 mL dan diinkubasi selama 30 menit, kemudian diukur meng-



Gambar 2 Isolat fungi lignolitik dan bakteri selulolitik. (A) Isolat fungi lignolitik dan zona cokelat kemerahan di sekitar koloni dan (B) Zona bening pada di sekitar koloni isolat bakteri selulolitik.

gunakan spektrofotometer λ 310 nm (Bonnen *et al.* 1994).

• **Uji aktivitas mangan-peroksidase (Mn-P)**

Ekstrak enzim sebanyak 0,2 mL ditambahkan pada larutan bufer sitrat fosfat dengan pH 5,5 sampai dengan 2 mL. Kemudian

1 mL guaiakol ditambahkan, 1 mL $MnSO_4$, 1 mL H_2O_2 50 M, dan campuran dihomogenkan. Campuran diinkubasi selama 15 menit. Konsentrasi guaiakol dibaca pada λ 465 nm (Bonnen *et al.* 1994). Perhitungan aktivitas enzim adalah sebagai berikut:

$$\text{Aktivitas enzim (U/mL)} = \frac{(At - Ao) \times V_{total} (ml) \times 10^6}{\epsilon_{maks} \times d \times vol \text{ enzim} (ml) \times t}$$

Keterangan:

- Ao = Absorbans awal (menit ke-0)
- At = Absorbans akhir (menit ke-30)
- d = Tebal kuvet
- ϵ_{maks} = Absorpsivitas molar
- Vtotal = Volume larutan + enzim
- Vol. enzim = Volume enzim
- t = Waktu inkubasi

Konsentrasi pereaksi:

- ABTS = 36000 $M^{-1} cm^{-1}$
- Guaiakol = 12100 $M^{-1} cm^{-1}$
- Veratril alkohol = 9300 $M^{-1} cm^{-1}$

• **Uji aktivitas selulase**

Aktivitas enzim selulase ditetapkan dengan metode spektrofotometri (Mandels *et al.* 1976). Ekstrak enzim direaksikan dengan bufer sitrat 1 mL (pH 5) dan 0,5 mL 1% CMC, diinkubasi pada suhu 50°C selama 1 jam, kemudian ditambahkan 3 mL DNS. Campuran sampel dipanaskan dalam air mendidih (100°C) selama 5 menit (Gupta *et al.* 2015) kemudian diukur pada λ 540 nm.

• **Uji aktivitas eksoglukanase (FP-ase)**

Aktivitas eksoglukanase (FP-ase) diuji menggunakan campuran reaksi yang mengandung 1 mL larutan enzim kasar (supernatan) dengan 2 buah (1 x 1,5 cm) kertas Whatman No.1, dan 1 mL larutan bufer natrium asetat 50 mM (pH 5.0), kemudian diinkubasi pada suhu 50 °C selama 1 jam. Pengukuran dilakukan pada λ 540 nm untuk menetapkan gula tereduksi hasil dari hidrolisis selulosa dengan enzim selulase (Duza & Mastan 2013; Dar *et al.* 2015).

• **Uji aktivitas β -Glukosidase**

Aktivitas β -glukosidase diuji dengan menggunakan 1 mL enzim kasar yang ditambahkan 1 mL Avicel 1% di dalam 100 mM bufer fosfat pH 7. Campuran ini diinkubasi selama 30 menit. Reaksi dihentikan dengan menambahkan 1 mL DNS, lalu dididihkan selama 5 menit. Absorbans diukur dengan metode spektrofotometri pada λ 401 nm.

Analisis Data

Data hasil pengukuran fluks CO_2 dan kadar air dianalisis ragam menggunakan program SPSS dan diuji lanjut dengan uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf 5%. Total populasi mikroba dan enzim disajikan dalam grafik dan tabel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ciri Lahan Gambut pada Lokasi Studi

Berdasarkan cirinya diketahui bahwa gambut pada lokasi studi termasuk ke dalam gambut jenis oligotrofik karena berukuran tebal (<400 cm) (Tabel 2). pH gambut pada lokasi penelitian termasuk pada kriteria sangat masam dengan nilai 3,87. Bobot isi pada gambut menunjukkan nilai 0,15 g/cm^3 . Nilai tersebut termasuk ke dalam kategori rendah. Rendahnya bobot isi dari gambut pada lokasi penelitian dapat menun-

jukkan tipe kematangan gambut. Dari hasil bobot isi gambut tersebut dapat diketahui bahwa kematangan gambut termasuk ke dalam kategori gambut hemik. Sampurno *et al.* (2017) pada penelitiannya menyatakan bobot isi gambut hemik berada dalam kisaran 0,11–0,19 g/cm³. Gambut hemik (setengah matang) merupakan gambut dengan tingkat pelapukan sedang karena sebagian material telah melapuk, dan sebagian lagi masih berupa serat dan berwarna cokelat (Khotimah *et al.* 2020).

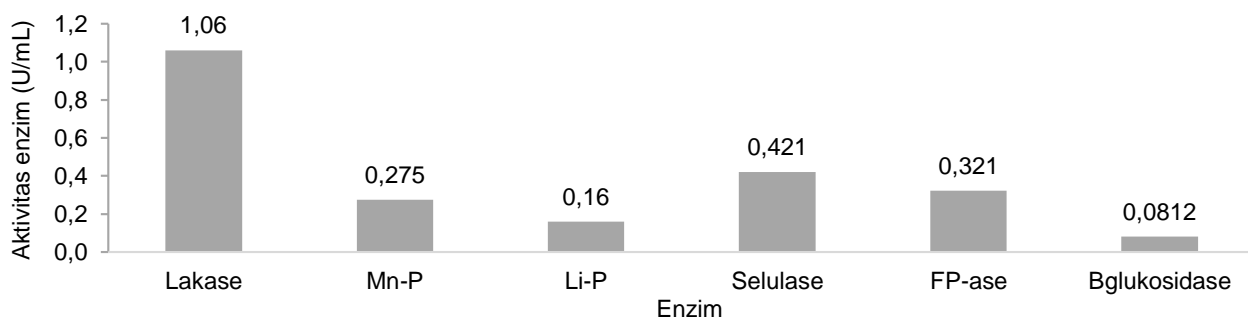
Isolat mikrob pada sampel menunjukkan perbedaan kelimpahan mikrob, secara berurutan yang paling mendominasi adalah bakteri, fungi, fungi lignolitik, dan bakteri selulolitik, yang kepadatannya disajikan pada Tabel 3. Total populasi mikrob dan fungi lebih mendominasi dibandingkan dengan proporsi bakteri selulolitik dan fungi lignolitik. Bakteri termasuk mikrob yang paling mendominasi. Temuan Winsborough dan Basiliko (2010) menyatakan bahwa pada beberapa lahan gambut, kelimpahan bakteri lebih mendominasi dibandingkan dengan fungi. Girkin (2020) juga menyatakan bahwa secara umum kelimpahan bakteri seperti bakteri Gram negatif terutama Acidobacteria banyak ditemukan pada gambut tropis. Pada kajiannya, nisbah fungi:bakteri (0,12–0,13) dan bakteri Gram positif: Gram negatif (0,65–0,68) konsisten antarjenis gambut.

Bakteri menunjukkan kepadatan mikrob yang tinggi tetapi secara keseluruhan mikrob yang dianalisis, Tabel 2 Ciri tanah pada keadaan awal

Parameter	Satuan	Nilai
pH	-	3,87
Tebal gambut	cm	550
C-Organik	%	56,34
N-Total	%	0,89
Bobot isi	g cm ⁻³	0,14
C/N	-	63,30
Lignin	%	22,64
Selulosa	%	35,88

Tabel 3 Kepadatan mikrob pada gambut lokasi studi

Kepadatan mikrob	CFU/g
Mikrob	$2,4 \times 10^7$
Fungi	$5,3 \times 10^5$
Bakteri selulolitik	$4,2 \times 10^2$
Fungi lignolitik	$5,0 \times 10^3$



Gambar 3 Aktivitas enzim lignoselulolitik pada mikrob gambut pada awal pengambilan sampel.

kepadatan mikrob pada gambut menunjukkan jumlah yang rendah. Aktivitas mikrob sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungannya, salah satunya adalah kondisi pH tanah (Kunitake 2017). pH tanah memengaruhi kelimpahan mikrob pada gambut. pH gambut pada lokasi studi termasuk ke dalam kategori masam (pH 3,87). Pada tanah dengan pH masam, aktivitas mikroorganisme sangat rendah (Khotimah *et al.* 2020).

Mikrob pada gambut memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energinya. Substrat gambut tropis berasal dari sisa-sisa tumbuhan seperti daun, akar, batang, dan cabang (Too *et al.* 2018). Mikrob heterotrof adalah mikrob yang memanfaatkan bahan organik sebagai sumber makanannya. Lignin dalam jaringan tanaman sulit didegradasi karena karena strukturnya yang kompleks dan heterogen yang berikatan dengan selulosa dan hemiselulosa. Mikrob yang memiliki aktivitas lignoselulolitik diketahui merupakan mikrob dari golongan bakteri (Widiastuti *et al.* 2015; Xu *et al.* 2018), aktinomisetes, dan jamur (Choirunnisa *et al.* 2017).

Isolat fungi lignolitik dan bakteri selulolitik yang telah melalui penapisan dan konfirmasi kemampuan degradasi lignin maupun selulosa kemudian dilanjutkan pada uji enzimatik untuk mengukur besarnya aktivitas enzim (Gambar 3). Mikrob penghasil enzim pendegradasi lignin sebagian besar adalah dari kelompok fungi karena berperan penting dalam mengkatalisis oksidasi

berbagai senyawa aromatik (Vrsanska *et al.* 2016). Sheikhi *et al.* (2012) juga menyatakan bahwa lakase sebagai enzim pendegradasi lignin umumnya ditemukan pada tumbuhan dan jamur, selain terdapat pada beberapa bakteri, termasuk *Azospirillum lipoferum*, *Bacillus phaericus*, *Marinomonas mediterranea*, *Streptomyces griseus*, dan *Serratia marcescens*. Lakase yang dihasilkan fungi menunjukkan hasil tertinggi dibandingkan dengan enzim lainnya, yakni 1,06 U/mL, diikuti oleh selulase 0,421 U/mL, mangan-peroksidase 0,275 U/mL, lignin-peroksidase 0,16 U/mL, FP-ase 0,32 U/mL, dan β -glukosidase 0,08 U/mL. Tingginya kemampuan mikrob dalam memproduksi enzim ekstraseluler bergantung pada lingkungan dan sifat tersebut.

Pengaruh Tambahan Amelioran pada Fluks CO₂

Amelioran zeolit dan bioarang diinkubasikan selama 4 bulan di dalam toples. Perbedaan jenis kombinasi amelioran memengaruhi fluks CO₂ gambut (Tabel 4 dan 5). Tambahan zeolit dan bioarang berpengaruh nyata pada fluks CO₂, tetapi tidak demikian dengan tingkatan persentase dosis yang berbeda. CO₂ secara cepat diserap oleh ruang pori

pada zeolit sebagai substrat, sedangkan secara kimia CO₂ dapat diserap oleh situs pengikatan spesifik (Kusumastuti *et al.* 2019). Bioarang juga diketahui dapat menekan fluks CO₂ pada tanah dengan kemampuan yang berbeda sesuai cirinya. Kapasitas adsorpsi CO₂ dari bioarang bergantung pada sifat fisikokimianya, seperti luas permukaan, ukuran pori, volume pori, permukaan bioarang, keberadaan gugus fungsi pada permukaan, keberadaan logam alkali dan alkali tanah, hidrof-obisitas, dan polaritas (Chiang *et al.* 2017). Kemampuan dalam menekan CO₂ yang menurun terindikasi pada bulan ke-3 dapat diakibatkan oleh jenuhnya bagian pori pada permukaan bioarang.

Pengaruh Tambahan Amelioran pada Kadar Air

Analisis ragam pada parameter pengukuran kadar air gambut yang diinkubasi menunjukkan pengaruh nyata pada perlakuan perbedaan jenis amelioran, tetapi tidak demikian pada perbedaan dosis (Tabel 6 dan 7). Kadar air pada gambut menurun secara nyata pada semua perlakuan sampai dengan bulan ke-4. Tambahan amelioran dapat menekan penurunan kadar air dibandingkan dengan kontrol. Perlakuan tunggal zeolit dan bioarang dapat menekan penurunan

Tabel 4 Pengaruh kombinasi jenis amelioran pada fluks CO₂

Perlakuan	Kode	Fluks CO ₂ (μmol/m ² /sec)			
		Bulan 1	Bulan 2	Bulan 3	Bulan 4
Kontrol	A0	0,76 b	0,44 c	0,20 cd	0,04 bc
Zeolit	A1	0,40 a	0,30 a	0,07 a	0,02 a
Bioarang	A2	0,61 ab	0,33 ab	0,20 cd	0,04 bc
Zeolit:bioarang (75:25)	A3	0,43 a	0,31 a	0,08 a	0,02 ab
Zeolit:bioarang (25:75)	A4	0,58 ab	0,41 bc	0,14 bc	0,03 ab
Zeolit:bioarang (50:50)	A5	0,40 a	0,33 ab	0,14 b	0,02 a

Keterangan: Bilangan dengan huruf belakang berbeda pada kolom yang berarti berbeda nyata pada uji DMRT 5%.

Tabel 5 Pengaruh persentase dosis amelioran pada fluks CO₂

Dosis % (b/b)	Kode	Fluks CO ₂ (μmol/m ² /sec)			
		Bulan 1	Bulan 2	Bulan 3	Bulan 4
1,5	D1	0,53	0,33	0,14	0,03
3	D2	0,60	0,37	0,12	0,02
4,5	D3	0,49	0,35	0,15	0,03

Tabel 6 Pengaruh aplikasi amelioran terhadap kadar air gambut

Perlakuan	Kode	Kadar Air (%)			
		Bulan 1	Bulan 2	Bulan 3	Bulan 4
Kontrol	A0	223 a	49 a	24 a	17 a
Zeolit	A1	270 bc	72 b	31 c	24 c
Biochar	A2	270 bc	56 ab	29 b	24 c
Zeolit:Biochar (75:25)	A3	256 b	56 ab	30 bc	20 b
Zeolit:Biochar (25:75)	A4	250 b	57 a	30 bc	20 ab
Zeolit:Biochar (50:50)	A5	278 c	69 b	30 bc	21 b

Keterangan: Bilangan dengan huruf belakang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata pada uji DMRT 5%.

Tabel 7 Pengaruh persentase dosis amelioran terhadap kadar air gambut

Perlakuan	Kode	Kadar Air (%)			
		Bulan 1	Bulan 2	Bulan 3	Bulan 4
Dosis 1,5 % (b/b)	D1	261	58	29	20
Dosis 3% (b/b)	D2	251	60	30	21
Dosis 4,5 (b/b)	D3	261	65	31	22

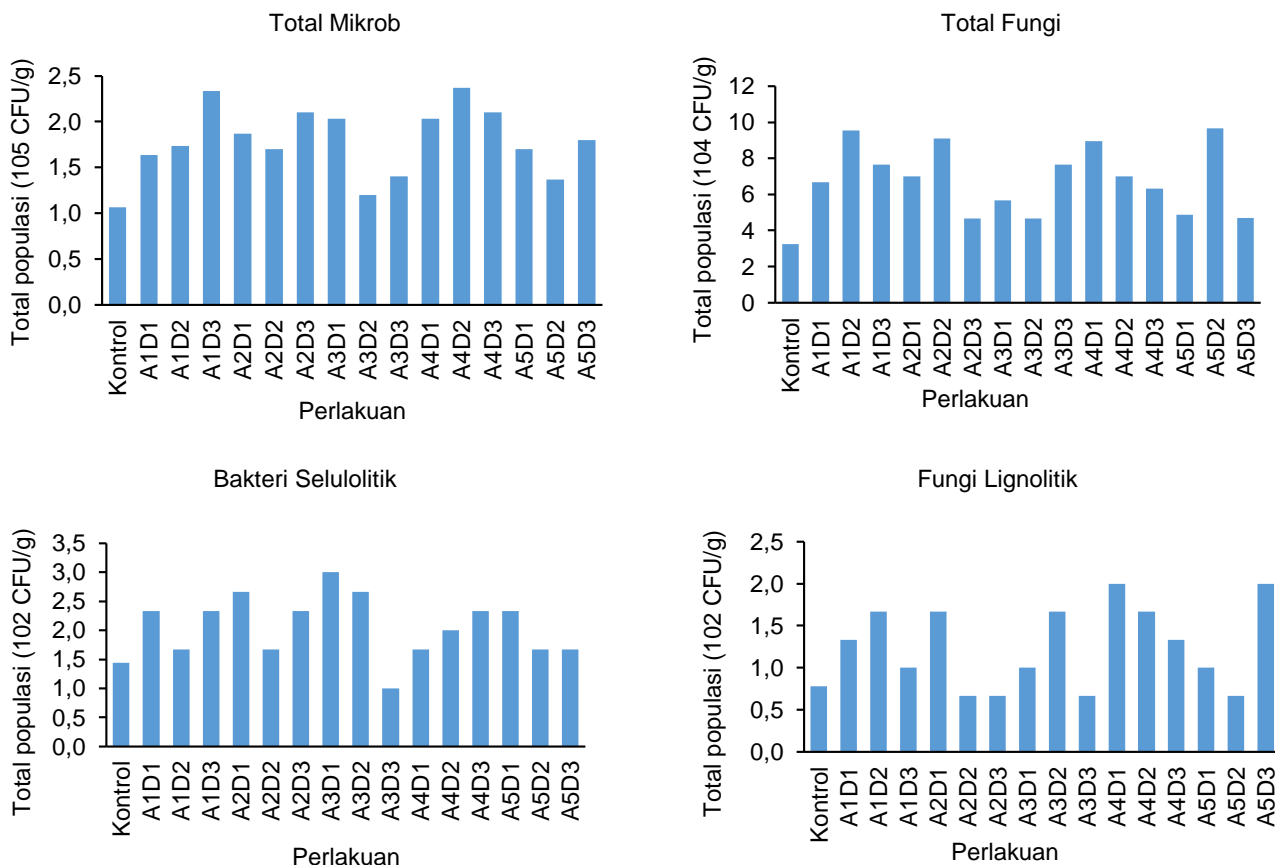
kadar air dengan baik karena struktur fisik yang dimiliki oleh zeolit, sehingga air tertahan lebih banyak pada ruang pori. Struktur tiga-dimensi zeolit yang berpori dapat diisi dan mengikat kation lain, molekul air, dan ion logam. Ion logam dan molekul air dapat bergerak dengan bebas dalam kerangka zeolit. Hal tersebut menjadikan zeolit dapat digunakan untuk pertukaran ion tanpa mengalami perubahan dalam struktur kristal zeolit (Atikah 2017). Mondal *et al.* (2021) melaporkan bahwa kapasitas menahan air pada tanah yang diberi tambahan zeolit meningkat 0,4–1,8% dalam kondisi kekeringan, dan 5–15% dalam situasi normal dibandingkan dengan tanah yang tidak diberi perlakuan zeolite.

Total Populasi Mikrob

Mikrob yang ada di dalam gambut masih dapat hidup setelah diinkubasi selama 4 bulan (Gambar 4), walaupun jumlahnya menurun dibandingkan dengan sebelum perlakuan dan inkubasi. Jumlah mikrob antar perlakuan bervariasi, namun pada perlakuan kontrol secara umum memiliki jumlah yang lebih rendah. Hal tersebut disebabkan oleh kondisi lingkungan yang

tidak lagi optimum untuk mikrob. Kadar air gambut yang menurun secara drastis menyebabkan cekaman lingkungan sehingga banyak mikrob yang tidak dapat bertahan dan mengakibatkan jumlah mikrob berkurang. Siebielec *et al.* (2020) menjelaskan bahwa penurunan kadar air tanah dapat menyebabkan terjadinya tekanan osmotik hipertonic, mengakibatkan penurunan aktivitas mikrob atau terjadinya pengeringan sel.

Selain karena kondisi cekaman air yang membuat jumlah mikrob berkurang, ketidakadaan eksudat akar juga dapat mempengaruhi kelimpahan mikrob. Lahan gambut di alam yang ditanami kelapa sawit maupun yang terdapat vegetasi di atasnya, mengeluarkan eksudat akar dari tanaman yang dimanfaatkan oleh mikrob sebagai pasokan energi. Bagian rhizosfir akar memiliki komunitas mikrob yang lebih melimpah dibandingkan wilayah yang jauh dari perakaran. Eksudat akar mengandung senyawa-senyawa karbon, senyawa karbon pada eksudat akar (ion, gula, asam amino, asam organik) tersebut dilepaskan dari akar secara tidak langsung melalui lisis sel akar, maupun secara langsung melalui proses rhizodesposisi (Naylor dan Derr 2018).



Gambar 4 Total populasi mikrob, fungi, bakteri selulolitik, dan fungi lignolitik yang diisolasi dari gambut yang diberi perlakuan amelioran bioarang dan zeolit dan diinkubasi selama 4 bulan. A0 (kontrol/tanpa amelioran); A1D1 (zeolit 1,5%); A1D2 (zeolit 3%); A1D3 (zeolit 4,5%); A2D1 (bioarang 1,5%); A2D2 (bioarang 3%); A2D3 (bioarang 4,5%); A3D1 (zeolit:bioarang 75:25, 1,5%); A3D2 (zeolit:bioarang 75:25, 3%); A3D3 (zeolit:bioarang 75:25, 4,5%); A4D1 (zeolit:bioarang 25:75, 1,5%); A4D2 (zeolit:bioarang 25:75, 3%); A4D3 (zeolit:bioarang 25:75, 4,5%); A5D1 (zeolit:bioarang 50:50, 1,5%); A5D2 (zeolit:bioarang 50:50, 3%); dan A5D3 (zeolit:bioarang 50:50, 4,5%).

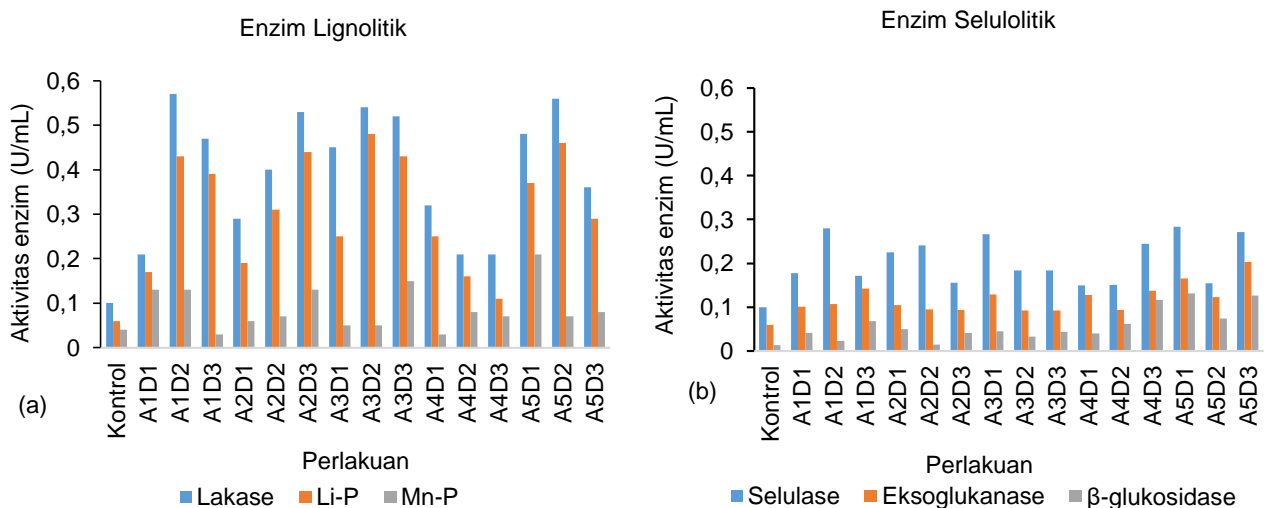
Aktivitas Enzimatik pada Mikrob

Aktivitas enzim diukur secara kualitatif dari isolat bakteri selulolitik dan fungi lignolitik yang diisolasi dari gambut yang telah diberi amelioran bioarang dan zeolit setelah 4 bulan inkubasi di laboratorium. Enzim yang berperan dalam perombakan senyawa lignin dan selulosa di antaranya adalah kompleks enzim lignolitik dan selulolitik. Bakteri dan fungi mampu memproduksi enzim tersebut untuk dapat mendegradasi senyawa lignin dan selulosa. Gambar 5 menunjukkan dinamika produksi enzim yang dihasilkan oleh isolat pada setiap perlakuan. Aktivitas enzim oleh mikro lignoselolitik berbeda-beda pada setiap isolat yang terdapat pada sampel. Aktivitas enzim lignolitik pada fungi memiliki rentang aktivitas enzim lebih tinggi (0,03–0,57 U/mL) (Gambar 5a) dibandingkan dengan aktivitas enzim selulolitik yang dihasilkan oleh bakteri (0,01– 0,28 U/mL) (Gambar 5b) dibandingkan dengan aktivitas enzim selulolitik yang dihasilkan oleh bakteri (0,01– 0,28 U/mL). Lakase dan selulase menunjukkan aktivitas enzim yang lebih dominan dibandingkan dengan jenis enzim pendegradasi lainnya. Aktivitas Mn-P pada fungi dan dan β -glukosidase pada bakteri selulolitik adalah yang paling rendah. Selulosa adalah polisakarida terpenting dan komponen utama dinding sel tumbuhan. Selulase merupakan istilah kompleks untuk mendenominasikan sekelompok tiga enzim: (1) endo-1,4- β -D glukanasase (endoglukanase), ekso-1,4- β -D glukanasase (eksoglukanase), dan β -glukosidase (Menendez *et al.* 2015). Enzim tersebut bekerja sama dan bertanggungjawab dalam menghidrolisis selulosa. Secara alami, selulosa dapat didegradasi oleh bakteri aerobik maupun anaerobik, fungi, dan serangga (Hosseini dan Shah 2011).

Lakase, lignin peroksidase (Li-P), dan mangan peroksidase (Mn-P) adalah enzim yang dapat mendegradasi lignin. Mikrob penghasil enzim pendegradasi lignin sebagian besar termasuk ke dalam kelompok fungi, karena banyak berperan dalam mengkatalisis oksidasi berbagai senyawa aromatik (Vrsanska *et al.* 2016). Aktivitas lakase pada isolat fungi lignolitik menunjukkan rata-rata hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan enzim lignin peroksidase (Li-P) dan mangan peroksidase (Mn-P). Hasil tersebut sesuai dengan laporan Janusz *et al.* (2017), bahwa lakase merupakan enzim yang dominan pada mikroorganisme yaitu jamur, bakteri, dan aktinomisetes. Dominasi enzim lakase yang dihasilkan oleh fungi lignolitik tersebut dapat karena lakase memiliki keuntungan untuk mengoksidasi berbagai macam bahan organik atau senyawa anorganik, termasuk fenol (misalnya, katekol, hidrokuinon, 2,6-dimetoksifenol, dan siringaldazina), amina aromatik, dan askorbat (Vrsanska *et al.* 2016).

KESIMPULAN

Amelioran jenis bioarang dan zeolit mampu menekan fluks CO₂ pada gambut dibandingkan dengan kontrol. Amelioran tunggal berupa zeolit menekan fluks CO₂ yang terbaik sampai dengan bulan ke-4 inkubasi, tetapi perlakuan perbedaan dosis tidak berpengaruh nyata. Aplikasi amelioran zeolit dan bioarang tidak memengaruhi kelimpahan mikrob di akhir inkubasi. Mikrob masih dapat bertahan pada kondisi lingkungan yang kurang optimum dan



Gambar 5 Aktivitas enzim lignolitik (lakase, lignin peroksidase, mangan merosidase) dan enzim selulolitik (selulase, eksoglukanase, β -glukosidase) pada isolat yang diisolasi dari gambut yang diberi perlakuan amelioran bioarang dan zeolit dan diinkubasi selama 4 bulan. (A) Aktivitas enzim lignolitik pada fungi lignolitik, dan (B) Aktivitas enzim selulolitik pada bakteri selulolitik. Keterangan: A0 (kontrol/tanpa amelioran); A1D1 (zeolit 1,5%); A1D2 (zeolit 3%); A1D3 (zeolit 4,5%); A2D1 (bioarang 1,5%); A2D2 (bioarang 3%); A2D3 (bioarang 4,5%); A3D1 (zeolit:bioarang 75:25, 1,5%); A3D2 (zeolit:bioarang 75:25, 3%); A3D3 (zeolit:bioarang 75:25, 4,5%); A4D1 (zeolit:bioarang 25:75, 1,5%); A4D2 (zeolit:bioarang 25:75, 3%); A4D3 (zeolit:bioarang 25:75, 4,5%); A5D1 (zeolit:bioarang 50:50, 1,5%); A5D2 (zeolit:bioarang 50:50, 3%); A5D3 (zeolit:bioarang 50:50, 4,5%).

jumlahnya beragam pada setiap perlakuan. Aktivitas enzim lignoselulolitik pada mikrob juga beragam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Bioteknologi dan Bioindustri Indonesia (PPBBI) yang telah memfasilitasi dan mendanai kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus F, Handayani E, Noordwijk MV, Idris K, Sabiham S. 2010. Root respiration interferes with peat CO₂ emission measurement. Paper presented in 19th world congress of soil science, Soil Solutions for a Changing World. 1–6 August 2010. Brisbane-Australia (AU).
- Apriyanti E. 2012. Adsorpsi CO₂ Menggunakan zeolit: aplikasi pada pemurnian biogas. *Jurnal Universitas Pandanaran*. 10(23): 18–27.
- Atikah WS. 2017. Potensi zeolit alam gunung kidul teraktivasi sebagai media adsorben pewarna tekstil. *Arena Tekstil*. 32(1): 17–24.
- Bonnen AM, Anton LH, Orth AB. 1994. Lignin-degrading enzymes of the commercial button mushroom, *Agaricus bisporus*. *Applied and Environmental Microbiology*. 60(3): 960–965.
- Case SDC, McNamara NP, Reay DS, Whitaker J. 2014. Can biochar reduce soil greenhouse gas emissions from a Miscanthus Bioenergy Crop? *GCB Bioenergy*. 6(1): 76–89.
- Chiang Y, Juang R. 2017. Surface modifications of carbonaceous materials for carbon dioxide adsorption: a review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 71: 214–34.
- Choirunnisa, Zul D, Pratiwi NW. 2017. Formulasi mikroorganisme lignoselulolitik asal tanah gambut Desa Rimbo Panjang, Kampar, sebagai bioaktivator bentuk padat. *Jurnal Riau Biologia*. 2(2): 90–99.
- Dar AM, Pawar KD, Jadhav JP, Pandit RS. 2015. Isolation of cellulolytic bacteria from the gastro-intestinal tract of *Achatina fulica* (Gastropoda: Pulmonata) and their evaluation form cellulose biodegradation. *International biodeterioration and biodegradation*. 98: 73–80.
- Duza MB, Mastan SA. 2013. Isolation, characterization and screening of enzyme producing bacteria from different soil samples. *International Journal of Pharma and Biosciences*. 4(2): 813–824.
- Eichlerova IJ, Snajdr P, Baldrian. 2012. Laccase activity in soils. Considerations for the measurement of enzyme activity. *Elsevier. Chemosphere*. 88(10): 1154–1160.
- Girkin NT, Lopes dos Santos RA, Vane CH, Ostle N, Turner BL, Sjögersten S. 2020. Peat properties, dominant vegetation type and microbial community structure in a tropical peatland. *Wetlands*. 40: 1367–1377.
- Gupta C, Jain P, Kumar, Dixit AK, Jain RK. 2015. Production of cellulase enzyme from isolated fungus and its application as efficient refining aid for production of security paper. *International Journal Applied Microbiology and Biotechnology Research*. 3(1): 11–19.
- Hergoualc'h K, Verchot L. 2011. Stocks and fluxes of carbon associated with land use change in Southeast Asian tropical peatlands: A review. *Global Biogeochemical Cycles*. 25(2): 1-13.
- Hosseini SA, Shah N. 2011. Modelling enzymatic hydrolysis of cellulose part I: population balance modelling of hidrolisis by endoglucanase. *Biomass and Bioenergy*. 35(9): 3841-3848.
- Janusz G, Pawlik A, Sulej J, Swiderska-Burek U, Jarosz-Wilkolazka A, Paszczynski A. 2017. Lignin degradation: microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution. *FEMS Microbiology Reviews*. 41(6): 941–962.
- Jaya GP, Siregar EBM, Annab N. 2015. Uji potensi fungi pelapuk putih pada kayu karet lapuk (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) sebagai pendegradasi lignin. *Peronema Forestry Science Journal*. 4(2): 103-109.
- Khotimah S, Suharjono, Ardyati T, Nuraini Y. 2020. Isolation and identification of cellulolytic bacteria at fibric, hemic and sapric peat in Teluk Bakung Peatland, Kubu Raya District, Indonesia. *Biodiversitas*. 21(5): 2103–2112.
- Kunitake E, Kobayashi T. 2017. Conservation and diversity of the regulators of cellulolytic enzyme genes in Ascomycete fungi. *Current Genetic*. 63(6): 951–958.
- Kusumastuti R, Sriyono, Pancoko M, Butar-Butar SL, Putra GE, Tjahjono H. 2019. Study on the mechanism of CO₂ adsorption process on zeolite 5A as a molecular sieve in RDE system: an infrared investigation. *Journal of Physics: Conference Series*. 1198(3): 1-8.
- Madsen R, Xu L, Claassen B, McDermitt D. 2009. Surface monitoring method for carbon capture and storage projects. *Energy Procedia*. 1(1): 2161–2168.
- Mandels M, Andreotti R, Roche C. 1976. Measurement of saccharifying cellulase. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*. 6: 21-33.

- Melling L, Tan CSY, Goh KJ, Hatano R. 2013. Soil microbial and root respirations from three ecosystems in tropical peatland of Sarawak, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*. 25(1): 44–57.
- Mondal M, Garai S, Banerjee H, Sarkar S, Kundu R. 2020. Mulching and nitrogen management in peanut cultivation: An evaluation of productivity, energy trade-off, carbon footprint and profitability. *Energy Ecology and Environment*. 6(3): 1–15.
- Murtiyaningsih H, Hazmi M. 2017. Isolasi dan uji aktivitas enzim selulase pada bakteri selulolitik asal tanah sampah. *Agritrop*. 5(2): 293–308.
- Naylor D, Colemann-Derr D. 2018. Drought stress and root-associated bacterial communities. *Frontiers in Plant Science*. 8(2223): 1–16.
- Reksohadwinoto BS, Rosmalawati S, Cahyana PT, Hariyanto. 2017. Laccase enzyme from edible mushroom for bioleaching sago starch with environmentally friendly. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 18(2): 224–232.
- Sampurno J, Muid A, Zulfian, Latief FDE. 2017. Characterization the geometry of the peat soil of Pontianak using fractal method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1040(1): 1–8.
- Sharma A, Aggarwal NK, Yadav A. 2017. Isolation and screening of lignolytic fungi from various ecological niches. *Universal Journal of Microbiology Research*. 5(2): 25–34.
- Sheikhi F, Ardakani MF, Enayatizamir N, Rodriguez-Couto S. 2012. The determination of assay for laccase of bacillus subtilis wpi with two classes of chemical compounds as substrates. *Indian Journal of Microbiology*. 52(4): 701–707.
- Siebielec S, Siebielec G, Klimkowicz-Pawlas A, Gaatzka A, Grzadziel J, Stuczynski T. 2020. Impact of water stress on microbial community and activity in sandy and loamy soils. *Agronomy*. 10(9): 1–17.
- Sugiarto T, Oerbandono D, Widhiyanuriyawan, Putra FSP. 2013. Purifikasi biogas sistem kontinu menggunakan zeolit. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 4(1): 1–10.
- Too CC, Keller A, Sickel W, Lee SM, Yule, CM. 2018. Microbial community structure in a Malaysian tropical peat swamp forest: the influence of tree species and depth. *Frontiers in Microbiology*. 9(2859): 1-13.
- Vrsanska M, Voberkova S, Langer V, Palovcikova D, Moulick A, Adam V, Kopel P. 2016. Induction of laccase, lignin peroxidase and manganese peroxidase activities in white-rot fungi using copper complexes. *Molecules*. 21(11): 1–15.
- Widiastuti H, Prakoso HT, Suharyanto, Siswanto. 2015. Optimasi pengomposan tandan kosong kelapa sawit menggunakan dekomposer bakteri lignoselulolitik skala komersial. *Menara Perkebunan*. 83(2): 60–69.
- Winsborough C, Basiliko N. 2010 Fungal and bacterial activity in northern peatlands. *Geomicrobiology Journal*. 27(4): 315–320.
- Woolf D, Amonette JE, Street-Perrott FA, Lehmann J, Joseph S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communication*. 1(56): 1–9.
- Yusnia ED, Gunam IBW, Antara NS. 2019. Isolasi dan skrining bakteri selulolitik dari beberapa tanah hutan di Bali. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen*. 7(1): 11–20.