Jurnal Biologi Tropis

Original Research Paper

Cellulose-Degrading Microorganisms in Indonesian Peat Soils; A Literatur Review

Hefzi Prasetyo Azri Pratama* **& Tetty Marta Linda**
Program Studi Magister Biologi, Jurusan Biologi, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia;

Article History
Received : July 06th, 2026
Revised : October 15th, 2026
Accepted : October 23th, 2026

*Corresponding Author: **Hefzi Prasetyo Azri Pratama**, Program Studi Magister Biologi, Jurusan Biologi, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia;
Email: hefzi.prasetyo4333@grad.unri.ac.id

Abstract: Indonesian tropical peatlands contain large carbon stocks (estimated at 13.4-21.0 Mha depending on mapping methodology) and host microorganisms adapted to acidic, water-saturated, and nutrient-limited conditions (typically pH 3.0-5.5 across different regions). This literature review synthesizes evidence on cellulose-degrading bacteria and fungi reported from Indonesia peat soil, their distribution across peat types and depths, the evidence used to demonstrate cellulolytic activity, and potential biotechnological applications. Following a structured search protocol across PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar for studies published up to 2026, and relevant studies were selected based on predefined eligibility criteria and quality appraisal. Available studies report cellulolytic taxa including *Bacillus, Pseudomonas, Aspergillus, Penicillium,* and *Trichoderma,* but the strength of functional evidence varies among studies. Reported isolates are most frequently documented from surface layers (0-20 cm) across study sites, though findings remain localized. Geographic coverage remains uneven. Potential applications include *ex-situ* enzyme production, controlled processing of agricultural lignocellulosic residues, and biomass valorization. Applications aimed at field-scale inoculation or biofertilization reguire evaluation of strain safety, rhizosphere competence, and field performance. Enhancing cellulose degradation *in-situ* must be clearly decoupled from hydrological restoration, which prioritizes water-table management and carbon preservation. A systematic evidence map is needed before generalizing patterns nationally or recommending field-scale applications.

Keywords: Bioprospecting; Cellulolytic microorganisms; Peatland; Soil carbon.

Pendahuluan

Indonesia memiliki salah satu luasan lahan gambut tropis terbesar di dunia dengan estimasi berkisar antara 13,4 hingga 21,0 juta hektar (Mha), menjadikannya salah satu dari 5 negara pemilik lahan gambut terbesar secara global. Variasi estimasi luasan ini disebabkan oleh perbedaan metodologi pemetaan, definisi kedalaman minimum tanah gambut, serta pembaruan data spasial nasional (Warren *et al*., 2017; Anda *et al*., 2021),

Lahan gambut tropis di Indonesia utamanya tersebar di Sumatera Timur, Kalimantan, dan Papua. Ekosistem rawa gambut berfungsi sebagai deposit karbon penting yang terbentuk dari akumulasi sisa jaringan tumbuhan tergenang air dalam kondisi anoksik selama ribuan tahun (Page *et al*., 2011).

Sifat fisika-kimia gambut seperti kondisi jenuh air yang memicu potensial redoks rendah (anaerobik), derajat keasaman (pH) yang secara umum tergolong masam (kisaran pH 3.0-5.5 tergantung lokasi), tingginya rasio C/N, serta tingginya kandungan senyawa fenolik terlarut menjadi faktor pembatas utama bagi laju dekomposisi organik (Rieley *et al*., 2018; Kurnianto *et al*., 2019).

Tingkat kematangan gambut (fibrik, hemik dan saprik) secara langsung memengaruhi nilai porositas, ruang pori

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

© 2026 The Author(s). This article is open access

makro/mikro dan ketersediaan substrat terlarut (Norsiah *et al*., 2017). Pada lapisan gambut fibrik yang didominasi serat kasar berpori besar. Pada gambut saprik perombakan fisik telah lanjut sehingga ketersediaan senyawa karbon terlarut lebih tinggi dan mendukung aktivitas mikroorganisme heterotrof. Dinamika kematangan dan kondisi redoks ini membentuk relung ekologis (*ecological niche*) khusus yang membatasi sekaligus menyeleksi populasi mikroorganisme selulolitik *indigenous* yang memproduksi kompleks enzim selulase teradaptasi asam (Nurulita *et al*., 2018).

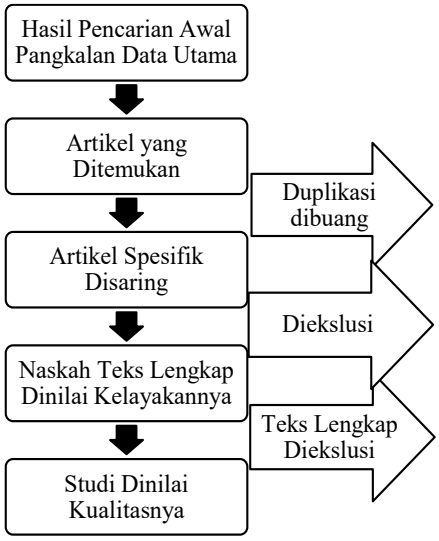
Sifat fisik tanah gambut didominasi oleh kapasitas retensi air yang sangat tinggi dan kejenuhan air konstan, yang secara langsung membatasi difusi oksigen serta menciptakan kondisi anoksik (potensial redoks rendah) di lapisan bawah (Simanjorang *et al*., 2019; Page *et al*., 2011). Selain suplai oksigen yang terbatas, terperangkapnya matriks organik di dalam lignin dan asam humat turut menghalangi kontak fisik mikroorganisme dengan struktur selulosa.

Selulosa merupakan polimer karbohidrat struktural kompleks yang relatif resisten terhadap dekomposisi alami pada kondisi lingkungan anaerobik masam tersebut. Perombakan jaringan selulosa tetap berlangsung secara bertahap melalui sekresi enzim hidrolitik oleh mikroorganisme teradaptasi. Bakteri selulolitik *indigenous* mengakatalisis pemutusan rantai ikatan β-1,4-glukosida secara spesifik melalui kompleks selulase (Khairiah *et al*., 2013), sementara fungi/jamur tanah berperan aktif pada zona aerasi permukaan (mikro-aerofilik) untuk mereduksi serasah lignoselulosa menjadi monomer karbon sederhana (Subowo, 2012).

Artikel review ini bertujuan untuk menyintesis secara sistematis bukti ilmiah mengenai keanekaragaman dan sebaran mikroorganisme pendegradasi selulosa di lahan gambut Indonesia, mengevaluasi aktivitas enzimatiknya, serta menilai potensi bioprospeksinya secara kritis dalam kerangka konservasi karbon dan *biosafety*. *Novelty* utama dari kajian ini terletak pada pendekatannya sebagai sintesis berbasis bukti komprehensif pertama yang secara spesifik memetakan dan menautkan empat domain utama mikroorganisme selulolitik gambut Indonesia: (1) cakupan geografis dan kedalaman sampel substrat, (2) taksonomi isolate (bakteri dan jamur), (3) tingkat pembuktian fungsional aktivitas selulolitik, serta (4) tingkat kesiapan aplikasi mulai dari laboratorium hingga pertimbangan risiko ekologis pada tingkat lapangan. Kajian ini memberikan kontribusi kritis dengan memisahkan potensi aplikasi *ex-situ* dari intervensi *in-situ* yang berisiko mempercepat akselerasi dekomposisi gambut.

Bahan dan Metode

Penelusuran dan sintesis literatur dilakukan menggunakan pendekatan studi penelaahan sistematis berbasis bukti dengan kriteria pencarian yang terdefinisi transparan agar dapat direplikasi.



Gambar 1. Diagram Alir Seleksi Literatur

Pangkalan Data dan Strategi Pencarian

Penelusuran literatur primer dibatasi pada tiga pangkalan data bibliografis terindeks utama: Scopus, Web of Science (WoS), dan PubMed, serta satu pangkalan data indeks nasional utama: Sinta, penelusuran tambahan menggunakan mesin pencari *Google Scholar* serta jejaring sitasi berbasis AI (Publish or Perish, ResearchRabbit, Connected Papers, dan Semantic Scholar) diterapkan secara terbatas seamta-mata untuk teknik pencarian perluasan sitasi guna mengecek artikel yang tidak terindeks langsung, namun tidak disetarakan dengan pangkalan data bibliografis utama.

Parameter Pencarian dan Kata Kunci

Pencarian eksekusi terakhir dilakukan secara serentak pada 07 Mei 2026. Kata kunci dirangkai menggunakan kombinasi operator *Boolean* (*and, or, not*) serta pembahasan tanda petik tunggal/ganda untuk istilah majemuk.

Kriteria Inklusi dan Ekslusi

Studi yang dikumpulkan disaring berdasarkan kriteria kualifikasi yang telah ditetapkan sebelum penelusuran pada tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Pemilihan Literatur

Parameter	Kriteria Inklusi	Kriteria Ekslusi
Rentang Tahun	Publikasi 15 tahun terakhir (2011 – 2026)	Artikel terbit di bawah tahun 2011
Tipe Publikasi	Artikel riset primer dan review terindeks	Wikipedia, blog, skripsi/tesis/disertasi, dan laporan cetak
Bahasa	Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia	Bahasa selain Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia
Fokus Riset	Isolasi, karakterisasi, pengujian enzimatik, atau sebaran mikroorganisme selulolitik dari tanah/sedimen gambut di Indonesia	Riset mikroorganisme selulolitik dari non gambut tanpa keterkaitan sampel gambut

Alur Deduplikasi, Screening, dan Sintesis Data

Prosedur penelusuran dan seleksi artikel mengikuti tahapan-tahapan yaitu, pencarian awal pada pangkalan data utama menghasilkan beberapa artikel. Verifikasi manual, menyisakan beberapa artikel yang spesifik. Tahap menyaring artikel berdasarkan kesesuaian kata kunci dan kriteria inklusi/ekslusi dasar, yang mengeliminasi beberapa artikel. Beberapa artikel dibaca secara menyeluruh untuk mengevaluasi metodologi pengujian aktivitas selulolitik dan validitas taksonomi isolat. Setelah melalui penilaian kualitas kritis, beberapa artikel riset primer terpilih secara rasional untuk disintesis secara deskriptif-kualitatif dan dipetakan ke dalam naskah review ini.

Hasil dan Pembahasan

Tanah Gambut

Ekosistem lahan basah gambut merepresentasikan lingkungan yang unik secara fisik, kimia, maupun biologis. Gambut berakar dari penumpukan sisa jaringan tumbuhan yang gagal terurai sempurna akibat kondisi jenuh air dan anaerob. Kondisi anaerobik ini menyebabkan aktivitas perombakan berjalan sangat lambat, memicu penumpukan bahan organik selama ribuan tahun (Page *et al*., 2011). Berdasarkan tingkat kematangan, tingkat dekomposisi, dan morfologi seratnya, tanah gambut diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu gambut fibrik, hemik, dan saprik (Norsiah *et al*., 2017; Page *et al*., 2011). Gambut fibrik merupakan gambut mentah yang dicirikan oleh kandungan serat tumbuhan kasar yang masih utuh dan tingkat dekomposisi yang masih sangat rendah. Gambut hemik merupakan tingkat kematangan setengah matang dengan proporsi serat antara 33% hingga 66%. Gambut saprik merupakan gambut matang yang didominasi oleh butiran yang tak terbentuk yang sangat halus, dengan kandungan serat kurang dari 33% serta tingkat dekomposisi yang tingi (Norsiah *et al*., 2017).

Sebagai wilayah dengan deposit gambut tropis terluas, wilayah Indonesia diprediksi memiliki cadangan lahan gambut berkisar antara 13,8 hingga 21,0 juta hektar yang terlokalisasi di Sumatera, Kalimantan, dan Papua (Warren *et al*., 2017; Anda *et al*., 2021). Tingginya konsentrasi karbon organik di dalam tanah menjadikan lahan ini sebagai instrument vital dalam pengendalian iklim global. Tekanan antropogenik seperti deforestasi, pembukaan saluran drainase untuk perkebunan, dan kebakaran hutan telah mendegradasi ekosistem ini secara signifikan. Degradasi tersebut memicu penurunan permukaan air tanah, peningkatan fluks oksigen, dan percepatan oksidasi bahan organik, yang mengubah fungsi dari penyerap karbon menjadi sumber emisi gas rumah kaca. Upaya restorasi lingkungan melalui pendekatan 3R (*Rewetting, Revegetation,* dan *Revitalisasi*) menjadi kunci penting bagi keberlanjutan ekosistem gambut (Leifeld and Menichetti, 2018; Turetsky *et al*., 2015; Ritzema *et al*., 2019; Giesen, 2019).

Perubahan penggunaan alih lahan dan alih fungsi ekosistem gambut secara makro terbukti memicu dinamika kehilangan stok karbon tanah yang signifikan (Putri *et al*., 2025). Bioprospeksi dan pemanfaatan mikroorganisme selulolitik *indigenous* harus dibatasi secara tegas pada aplikasi *ex-situ* serta dibedakan secara konseptual dari intervensi biologis *in-situ* yang berisiko mempercepat dekomposisi matriks tanah dan memicu kehilangan karbon lebih lanjut.

Siklus Nutrisi Tanah Gambut

Tanah gambut tergolong kurang subur karena memiliki reaksi tanah masam, keterbatasan hara makro, serta nilai kapasitas tukar kation tinggi yang didominasi oleh cekaman hidrogen dan aluminium (Rieley *et al*., 2018). Tingginya kandungan senyawa fenolik beracun di dalam jaringan gambut bertindak sebagai inhibitor yang menghambat aktivitas sebagian besar mikroorganisme pengurai (Kurnianto *et al*., 2019).

Kendati berada dalam kondisi ekstrem, lahan gambut tetap menjadi habitat bagi keanekaragaman mikroorganisme *indigenous* yang adaptif terhadap pH rendah, potensial redoks rendah, serta tingginya konsentrasi senyawa fenolik (Tripathi *et al*., 2018). Mikroorganisme teradaptasi ini memegang peranan utama dalam menjaga keberlangsungan siklus biogeokimia tanah melalui sekresi beragam enzim hidrolitik ekstraseluler seperti selulase, xilanase, amilase, protease, dan lipase guna mendegradasi fraksi bahan organik kompleks yang tersedia (Nurulita *et al*., 2018; Jannah *et al*., 2021). Spesifitas kerja enzim-enzim hidrolitik ini, khususnya selulase, sangat menentukan laju perpindahan nutrisi dan stabilitas simpanan karbon organik dalam tanah gambut. Pendekatan berbasis ekosistem dan integrasi ilmu pengetahuan, termasuk mikrobiologi tanah, menjadi kunci dalam menjaga keberlanjutan ekosistem gambut. Tanah gambut merupakan ekosistem yang kompleks dengan fungsi ekologis yang sangat penting.

Interaksi Mikroorganisme

Distribusi spasial dan vertical mikroorganisme selulolitik pada lahan gambut dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara kedalaman lapisan tanah, tingkat kematangan gambut, derajat keasaman (pH), potensial redoks, kelembapan, aerasi/oksigenasi, serta ketersediaan substrat organik terlarut. Meskipun mayoritas studi melaporkan kelimpahan dan aktivitas isolat tertinggi berada pada lapisan atas jenis gambut saprik, pola ini tidak dapat digeneralisasi secara nasional sebagai karakteristik umum seluruh lahan gambut Indonesia.

Bioprospeksi Mikroorganisme Penghasil Selulase

Selulase merupakan kompleks multi-enzim yang bekerja secara sinergis untuk memutus rantai polimer selulosa menjadi monomer glukosa. Kompleks ini terdiri atas tiga komponen fungsional utama dengan spesifitas substrat dan mekanisme aksi yang berbeda. Endoglukanase berfungsi untuk memutus ikatan *β*-1,4-glikosidik secara acak pada daerah *amorf* internal rantai selulosa, menghasilkan rantai oligomer bebas baru dengan pemotongan substrat turunan seperti *carboxymethyl cellulose* (CMC). Eksoglukanase berfungsi untuk menyerang ujung rantai selulosa kristalin secara berurutan untuk melepaskan unit disakarida selobiosa, yang diuji secara spesifik menggunakan substrat selulosa mikrokristalin.

β-Glukosidase berfungsi untuk menghidrolisis selobiosa dan oligosakarida rantai pendek menjadi molekul glukosa tunggal, yang umumnya diukur menggunakan substrat sintetik pNPG atau selobiosa bebas. Dalam evaluasi potensi bioprospeksi isolat gambut, tingkat pembuktian fungsional enzimatik harus dipilah secara ketat berdasarkan hierarki bukti. Pembuktian zona bening pada media Agar CMC dengan pewarnaan *Congo Red* hanya berfungsi sebagai indikator kualitatif presensi aktivitas selulolitik dan tidak dapat disetarakan dengan pengukuran aktivitas enzim kuantitatif spesifik yang diukur berbasis pelepasan gula pereduksi. Validasi bioprospeksi tingkat lanjut memerlukan karakterisasi Kinetika Enzim, toleransi kestabilan pH masam dan suhu, pemetaan identifikasi gen penyandi selulase, serta pengujian kinerja bioreaktor.

Pemanfaatan mikroorganisme selulolitik *indigenous* dari ekosistem gambut hendaknya diarahkan secara *ex-situ* pada strategi valorisasi limbah biomassa dan penerapan ekonomi sirkular (Ayu *et al*., 2025), guna mencegah gangguan *in-situ* yang berpotensi mengubah variasi dan

stabilitas cadangan karbon tanah akibat alih fungsi atau intervensi lahan (Putri *et al*., 2025)

Terkait arah pemanfaatan teknologis, aplikasi mikroorganisme selulolitik atau ekstrak selulase pada pengolahan residu lignoselulosa non-gambut sangat kompatibel dengan prinsip ekonomi sirkular dan aman secara ekologis. Aplikasi *in-situ* yang bertujuan mempercepat dekomposisi matriks tanah gambut harus dinilai secara hati-hati melalui kerangka evaluasi risiko manfaat untuk mencegah terjadinya percepatan kehilangan karbon tanah, emisi gas rumah kaca, dan subsidensi permukaan lahan.

Berikut disajikan rekapitulasi data hasil ekstaksi mengenai keanekaragaman takson, karakteristik habitat, metode validasi fungsional, serta potensi aplikasi spesifik mikroorganisme penghasil selulase yang diisolasi dari berbagai ekosistem gambut di Indonesia:

Tabel 2. Bioprospeksi dan Validasi Fungsional Mikroorganisme Penghasil Selulase dari Lahan Gambut Indonesia

Golongan	Spesies Mikroorganisme	Sumber Isolasi/Habitat	Karakteristik Unik/Sifat Enzim	Potensi Aplikasi Spesifik	Referensi
Bakteri	*Pseudomonas taiwanensis* dan *Bacillus cereus*	Tanah gambut Desa Bereng Bengkel, Palangkaraya, Kalimantan Tengah	Isolat secara molekuler memiliki aktivitas degradasi gambut yang tinggi, pemanfaatannya dapat dibatasi	Mempercepat pemadatan tanah gambut untuk rekayasa struktur tanah	Zulaika *et al*., 2022
Bakteri	*Bacillus* sp	Tanah gambut Giam Siak Kecil Bukit Batu Riau (GSKBB)	Isolat berupa basil Gram-positif dengan sifat aerob obligat/fakultatif yang laju pertumbuhannya bergantung pada ketersediaan oksigen dalam media	Bakteri selulolitik fermentasi bioetanol	Devitria dan Fatmi, 2017
Jamur	*Aspergillus niger*	Tanah gambut Rasaujaya, Kalimantan Barat	Jamur menghidrolisis selulosa	Pupuk hayati	Subowo, 2012
Bakteri	*Acetobacter, Acinetobacter, Azotobacter, Acidomonas, Pseudomonas,* dan *Cellvibrio*	Lahan gambut Desa Parit Banjar, Kecamatan Mempawah Hilir, Kabupaten Pontianak	Dekomposisi selulosa dengan memutuskan ikatan rantai 1,4-*β*-glukosida	Mempercepat dekomposisi tanah gambut mentah (fibrik) menjadi tanah gambut matang (saprik)	Khairiah *et al.,* 2013
Bakteri	*Bacillus, Pseudomonas,* dan *Nocardia*	Tanah gambut kawasan Bansir Darat, Kecamatan Pontianak Tenggara	Bakteri selulolitik memutuskan ikatan *β*-1,4 glikosida	enzim oleh bakteri selulolitik akan mendegradasi mikrofibril-mikrofibril penyusun selulosa	Ulfa *et al*., 2014
Bakteri	*Neisseria, Micrococcus, Bacillus, Pseudomonas, Flavobacterium,* dan *Actinobacillus*	Lahan gambut Desa Tagagiri Tama Jaya, Kecamatan Pelangiran, Kabupaten Inhil, Riau.	Tidak membuktikan kemampuan selulolitik	Potensi dalam mendegradasi selulosa	Fauziah dan Ibrahim, 2020

Golongan	Spesies Mikroorganisme	Sumber Isolasi/Habitat	Karakteristik Unik/Sifat Enzim	Potensi Aplikasi Spesifik	Referensi
Jamur	*Aspergillus*	Cagar Biosfer GSK-BB, Provinsi Riau	Memproduksi enzim selulase aktif pada kondisi pH rendah	Industri makanan, tekstil, bioenergi, kimia, bioremediasi, dan farmasi	Devitria dan Sepriyani, 2018
Jamur	*Penicillium, Trichoderma,* dan *Aspergillus*	Lahan gambut perkebunan karet Desa Rimbo Panjang, Kabupaten Kampar, Riau	Adaptasi dengan tanaman karet dan stabilitas pada keasaman	Dekomposisi limbah organik, industri bioetanol, makanan hewan	Roza *et al*., 2013
Jamur dan Bakteri	*Aspergillus, Culvularia, Fusarium, Penicillium chrysogenum, Penicillium digitatum, Penicillium* sp, *Mucor* sp, *Trichoderma, Vibrio* sp, *Micrococcus, Pseudomonas* sp, *Bacillus* sp, *Flavobacterium* sp, *Acinetobacter* sp,	Lahan gambut Nagari Ketaping, Kecamatan Batang Anai, Kabupaten Padang Pariaman	Suksesi mikroorganisme dan peningkatan sifat hidrolitik		Emalinda *et al*., 2014
Bakteri	*Bacillus*	Tanah gambut Desa Teluk Bakung, Kecamatan Ambawang, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat	Dominasi bakteri *Bacillus* dan variasi indeks selulolitik	Mempercepat proses degradasi	Khotimah *et al*., 2020

Kesimpulan

Ekosistem gambut Indonesia terbukti menyimpan keanekaragaman mikroorganisme selulolitik yang berpotensi tinggi untuk bioprospeksi *ex-situ,* seperti pemanfaatan limbah lignoselulosa pertanian dan produksi enzim industri. Pemetaan bukti ilmiah saat ini mengonfirmasi adanya keterbatasan cakupan geografis yang signifikan karena riset masih terfokus pada wilayah tertentu di Sumatera dan Kalimantan, serta keterwakilan data yang sangat minim dari Papua. Heterogenitas metode karakterisasi enzimatik yang didominasi oleh pengujian kualitatif zona bening disbanding kuantifikasi aktivitas enzim spesifik serta adanya potensi bias publikasi terhadap studi berhasil positif, menyebabkan pola distribusi dan potensi fungsional mikroorganisme selulolitik belum dapat digeneralisasikan secara nasional. Pengaplikasian mikroorganisme ini harus dibatasi pada ranah *ex-situ*, serta dihindarkan dari intervensi *in-situ* yang berisiko mempercepat dekomposisi gambut, amblesan lahan, dan emisi karbon. Tujuan utama konservasi dan pengolahan lahan gambut adalah mempertahankan simpanan karbon organik serta menjaga kondisi jenuh air, bukan mempercepat humifikasi maupun dekomposisi matriks tanah. Aplikasi mikroorganisme atau enzim selulolitik harus diarahkan secara tegas pada pemanfaatan biomassa lignoselulosa non gambut *ex-situ*, serta

produksi enzim industri, serta proses biokonversi terkontrol berbasis ekonomi sirkular. Pemanfaatan biologis *in-situ* yang berpotensi mempercepat degradasi tanah gambut tidak dapat direkomendasikan tanpa penilaian komprehensif terhadap neraca karbon, dinamika hidrologi, laju amblesan, keanekaragaman hayati, serta resiko ekologis secara menyeluruh. Penelitian lanjutan harus memprioritaskan validasi kepastian *strain*, karakterisasi kinetika enzim, genomika fungsional, dan uji keamanan biologis sebelum dipertimbangkan untuk aplikasi skala lapangan.

Referensi

Anda, M., S. Ritung., E. Suryani., Sukarman., M. Hikmat., E. Yatno., dan R.E. Subandiono. 2021. Revisiting Tropical Peatlands in Indonesia: Semi-Detailed Mapping, Extent and Depth Distribution. *Geoderma*. 402 (115235).

Anggi, D.O., A. Kurnain., F. Razie. 2024. Karakteristik Kimia Tanah Gambut pada Tiga Tipe Penggunaan Lahan. *Acta Solum 2*. 2 : 101 – 106.

Ayu, H., Wardatullatifah S, I. S., Hidayat, S., & Jannah, M. (2025). Pineapple Waste Processing Design as Functional Food to Support Agrotourism in East Lombok, Indonesia. Indonesian Journal of Tropical Biology, 1(3), 122–130.

Devitria, R. dan H. Sepriyani. 2018. Isolasi dan Karakterisasi Fungi Selulolitik dari Tanah Gambut Cagar Biosfer Giam Siak Kecil-Bukit Batu, Riau. *Jurnal Akademika Kimia*. 7 (4) : 200 – 205.

Devitria, R., dan D. Fatmi. 2017. Isolasi Bakteri Selulolitik dari Tanah Gambut Giam Siak Kecil Bukit Batu Riau. *Prosiding 2th Celscitech-UMRI 2017*. 2 : 1 – 4.

Emalinda, O., L. Maire., Y. Girsang., dan Juniarti 2014. Populasi dan Keragaman Mikroorganisme Tanah Gambut Alami dan Setelah Didrainase. *Prosiding Seminar Nasional BKS PTN Barat 2014: Bidang Ilmu Pertanian*. 463 – 470.

Fauziah, S.I., dan M. Ibrahim. 2020. Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Selulolitik pada Tanah Gambut di Desa Tagagiri Tama Jaya, Kecamatan Pelangiran, Kabupaten Inhil, Riau. *Lentera Bio*. 9 (3) : 194 – 203.

Giesen, W. 2019. Tropical Peatland Restoration Report. *Wetland International*. https://doi.org/10.65622/ijtb.v1i3.192

Jannah, R., N. Nurhayati., dan R. Sari. 2021. Potensi Bakteri Penghasil Enzim dari Tanah Gambut Indonesia. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia*. 16 (2) : 85 – 94.

Khairiah, E., S. Khotimah., dan A. Mulyadi. 2013. Karakterisasi dan Kepadatan Bakteri Pendegradasi Selulosa pada Tanah Gambut di Desa Parit Banjar Kabupaten Pontianak. *Jurnal Protobiont*. 2 (2) : 87 – 92.

Khotimah, S., Suharjono., T. Ardyati., dan Y. Nurani. 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.

Kurnianto, S., M. Warren., J. Talbot., J.B. Kauffman., D. Murdiyarso., and S. Frolking. 2019. Carbon Accumulation of Tropical Peatlands Over Milennia. *Global Change Biology*. 25 (11) : 3650 – 3662.

Leifeld, J., and L. Menichetti. 2018. The Underappreciated Potential of Peatlands in Global Climate Change Mitigation Strategies. *Nature Communications*. 9 (1071).

Norsiah., A. Ihwan., dan J. Sampurno. 2017. Identifikasi Jenis Gambut Berdasarkan Struktur Porinya dengan Menggunakan Geometri Fraktal. *Prisma Fisika*. 5 (2) : 55 – 60.

Nurulita, Y., E.M. Adetutu., K.K. Kadali., D. Zul., A.A. Mansur., and A.S. Ball. 2018. Assesment of Hydrolytic Enzyme Activity in Peat Soil Bacteria. *Biodiversitas*. 19 (5) : 1707 – 1713.

Osaki, M., and N. Tsuji. 2015. *Tropical Peatland Ecosystems*, Springer, Japan.

Page, S.E., and A.J. Baird. 2016. Peatlands and Global Change: Response and Resilience. *Annual Review of Environment and Resources*. 41 : 35 – 57.

Page, S.E., J.O. Rieley., and C.J. Banks. 2011. Global and Regional Importance of the Tropical Peatland Carbon Pool. *Global Change Biology*. 17 (2) : 798 – 818.

Putri, B. D. A. N., Bakti, L. A. A., Arifin, Z., & Zaki, M. (2025). Analysis of Soil Carbon Content Variation in Four Different Land

Use Types in West Lombok. Journal of Biology, Environment, and Edu-Tourism, 1(2), 67–75.

Rahmi, A., S. Fatimah., F. Julian., dan I. Falahudin. 2024. Karakteristik Tanah Gambut. *Prosiding SEMNASBIO 2024 Universitas Negeri Padang*.

Rieley, J.O., R.A.J. Wüst., J. Jauhiainen., S.E. Page., H. Wösten., A. Hooijer., and S. Limin. 2018. Tropical Peatlands: Carbon Stores, Carbon Gas Emissions and Contribution to Climate Change Processes. *Peatland Ecology Research Group*.

Ritzema, H., S. Limin., K. Kusin., J. Jauhainen., and H. Wösten. 2019. Canal Blocking Strategies for Hydrological Restoration of Degraded Tropical Peatlands in Indonesia. *Catena*. 114 : 11 – 20.

Roza, R.M., A. Martina., B.L. Fibriarti., D. Zul., dan N. Ramadhan. 2013. Isolasi dan Seleksi Jamur Selulolitik dari Tanah Gambut di Perkebunan Karet Desa Rimbo Panjang Kabupaten Kampar Riau. *Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung*. 263 – 266.

Saputra, R.A., S. Fatimah., M. Noor., dan J. Jumar. 2024. Dinamika Kemasaman dan Status Ionik pada Tanah Gambut yang diberi Berbagai Jenis Abu. *Agrotechnology Research Journal*. 8 (2) : 120 – 129.

Simanjorang, D.N.B., A. Waruwu., R.D. Susanti., dan S.R.N. Panjaitan. 2019. Uji Kapasitas Tiang Bambu dan Tiang Beton pada Tanah Gambut. *SEMNASTEK UISU 2019*.

Subowo, Y.B. 2012. Seleksi Jamur Tanah Pendegradasi Selulosa dan Pestisida Deltamethrin dari Beberapa Lingkungan di Kalimantan Barat. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 13 (2) : 221 – 230.

Tripathi, B.M., M. Kim., D. Singh., L. Lee-Cruz., A. Lai-Hoe., A.N. Ainuddin., and J.M. Adams. 2018. Distinctive Tropical Peat Swamp Forest Microbiomes. *Applied and Environmental Microbiology*. 78 (19) : 6935 – 6944.

Ulfa, A., S. Khotimah., dan R. Linda. 2014. Kemampuan Degradasi Selulosa oleh Bakteri Selulolitik yang Diisolasi dari Tanah Gambut. *Protobiont*. 3 (2) : 259 - 267.

Warren, M., S. Frolking., Z. Dai., and S. Kurnianto. 2017. Impacts of Land Use, Restoration, and Climate Change on Tropical Peat Carbon Stocks. *Global Change Biology*. 23 (12) : 1 – 15.

Worrall, F., G.D. Clay., K. Heckman., J. Ritson., M. Evans., and J. Small. 2024. The Formation of Peat Decreasing Density with Depth in UK Peats. *Soil Use and Management*. 40 : 1 – 19.

Zulaika, E., F. Solikhah., M.A.P. Utomo., N. Endah., and W. Assavalapsakul. 2022. Cellulose Degrading Bacteria Isolated from Palangkaraya, Central Kalimantan, Indonesia as Peat Fiber Decomposer to Accelerate Peat Soil Compression. *Biodiversitas*. 23 (3) : 1648 – 1654.