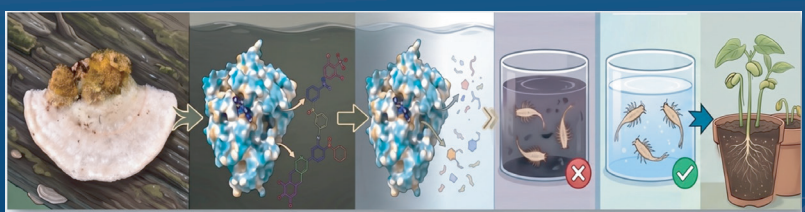
ISSN 3090-8485

ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

INOVASI ENZIM LAKASE BERBASIS BIODIVERSITAS INDONESIA SEBAGAI SOLUSI STRATEGIS UNTUK BIOREMEDIASI

ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU HAYATI
BIDANG MIKROBIOLOGI TERAPAN
KEPAKARAN BIOPROSES DAN BIOREMEDIASI



OLEH:
DEDE HERI YULI YANTO

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

ISSN 3090-8485

INOVASI ENZIM LAKASE BERBASIS BIODIVERSITAS INDONESIA SEBAGAI SOLUSI STRATEGIS UNTUK BIOREMEDIASI

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).
Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

ISSN 3090-8485

BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

INOVASI ENZIM LAKASE BERBASIS BIODIVERSITAS INDONESIA SEBAGAI SOLUSI STRATEGIS UNTUK BIOREMEDIASI

ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU HAYATI
BIDANG MIKROBIOLOGI TERAPAN
KEPAKARAN BIOPROSES DAN BIOREMEDIASI

OLEH:
DEDE HERI YULI YANTO

Penerbit BRIN

© 2026 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Mikrobiologi Terapan

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Inovasi Enzim Lakase Berbasis Biodiversitas Indonesia sebagai Solusi Strategis untuk Bioremediasi/Dede Heri Yuli Yanto. Jakarta – Penerbit BRIN, 2026

x + 128 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

1. Biodiversitas
2. Enzim Lakase
3. Jamur Pelapuk Kayu
4. Bioremediasi

572.754

Copy editor : Hilda Yunita
Proofreader : Hilda Yunita
Penata Isi : Hilda Yunita
Desainer Sampul : Hilda Yunita

Edisi pertama : Oktober 2026

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id
PenerbitBRIN
@Penerbit_BRIN
@penerbit.brin

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR VII
DAFTAR TABEL ix
BIODATA RINGKAS 1
PRAKATA PENGUKUHAN 5
BAB I. PENDAHULUAN 7
BAB II. PERKEMBANGAN LAKASE DAN ARAH RISET KE DEPAN DALAM BIDANG BIOREMEDIASI 11
A. Sejarah Penemuan Lakase 11
B. Karakteristik Katalitik Lakase 12
C. Perkembangan Lakase dalam Bidang Bioremediasi 16
D. Superior Lakase dari Jamur Pelapuk Kayu (JPK) 18
E. Arah Riset ke Depan dalam Bidang Bioremediasi 18
BAB III. INOVASI LAKASE UNTUK BIOREMEDIASI LINGKUNGAN 21
A. Esensi Karya Ilmiah Penulis 21
B. Bioprospeksi Enzim Lakase untuk Bioremediasi 22
C. Pengungkapan Potensi dan Identifikasi Biomolekuler 25
D. Temuan Lakase Baru Asli Indonesia 28
E. Pengembangan Sistem Lakase-Mediator 30
F. Teknik Imobilisasi Enzim Lakase 31
G. Pengungkapan Jalur Degradasi secara *In Vitro* 34
H. Detoksifikasi Cemaran oleh Lakase 37
I. Pengungkapan Mekanisme Degradasi secara *in Silico* 38
J. Diseminasi dan Aplikasi 42
BAB IV. PELUANG DAN TANTANGAN HILIRISASI ENZIM LAKASE DI INDONESIA 45
BAB V. ARAH STRATEGIS INOVASI ENZIM LAKASE DALAM MENDUKUNG HILIRISASI DAN KEMANDIRIAN ENZIM NASIONAL 47
BAB VI. KESIMPULAN 53
BAB VII. PENUTUP 55

UCAPAN TERIMA KASIH 57
DAFTAR PUSTAKA..... 61
DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI..... 77
DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI..... 79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penemuan dan perkembangan enzim lakase	12
Gambar 2.2	Representasi asam amino pada situs katalitik lakase *Trametes versicolor* (PDB 1KYA). Asam-asam amino penyusun jalur histidin-sistein ditampilkan dalam warna hijau.	13
Gambar 2.3	Perkembangan lakase dalam bidang bioremediasi lingkungan	17
Gambar 3.1	Bioprospeksi enzim lakase dari JPK asli Indonesia telah dilakukan oleh penulis sejak 2015–sekarang.	22
Gambar 3.2	Hasil pengamatan zona cokelat kemerahan di sekitar isolat yang ditumbuhkan pada media alkali-lignin, yang menunjukkan potensi penghasil lakase (a), serta penapisan JPK pada media RBBR-lignin untuk mengetahui potensi JPK dalam mendekolorisasi pewarna RBBR (b dan c)	24
Gambar 3.3	Mekanisme imobilisasi lakase pada LECA yang dimodifikasi oleh APTS dan glutaraldehida	32
Gambar 3.4	Produk myco-LECA (a), pengamatan miselia *T. hirsuta* EDN 082 pada myco-LECA menggunakan SEM (b)	33
Gambar 3.5	Jalur degradasi pewarna AB129 menggunakan lakase dari *T. hirsuta* EDN 082	35
Gambar 3.6	Jalur biodegradasi pewarna antrakuinon oleh *T. hirsuta* D7	36
Gambar 3.7	Jalur biodegradasi pewarna azo; (a) RB5, (b) AB113, (c) AO7	37

Gambar 3.8 Interaksi 2D lakase Thlacc1 rekombinan dan pewarna sintetik (a) *Acid Blue* 129, (b) *Acid Blue* 113, (c) *Reactive Black* 5, dan (d) *Direct Blue* 71 ..40
Gambar 3.9 Prototipe produk pasta gigi dan cairan kumur berbasis enzim lakase 43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Potensial redoks pada T1 lakase ($E^{0'}T1$) pada berbagai organisme dan sekuen asam amino penyandinya (Mate dan Alcalde, 2015).....14

Tabel 3.1 JPK unggul penghasil lakase asli Indonesia yang berhasil diisolasi selama proses bioprospeksi. 28

Tabel 3.2 Residu asam amino yang terlibat serta afinitas pengikatannya.....41

BIODATA RINGKAS



Dr. Dede Heri Yuli Yanto, S.Si., M.Agr., lahir di Jakarta pada tanggal 10 Juli 1981 dan adalah anak kedua dari Bapak Achmad Muhasar dan Ibu Sundari, dari empat bersaudara. Menikah dengan Nurul Aqidah, S.Si. dan dikaruniai empat orang anak, yaitu Nursyifa Naftakalia, Muhammad Alqowy Alfatih, Muhammad Sayyid Arroyah, dan Muhammad Syaddad Alliwa.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 46/M Tahun 2021 tanggal 18 Oktober 2021 yang bersangkutan diangkat dan dilantik sebagai Peneliti Ahli Utama di Badan Riset dan Inovasi Nasional terhitung mulai tanggal 1 November 2021.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 211/I/HK/2026 tanggal 14 September 2026 tentang pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat menyampaikan pidato pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri 11 Pagi, Jakarta Barat, tahun 1993; Sekolah Menengah Pertama Negeri 100, Jakarta Barat, tahun 1996; dan Sekolah Menengah Atas Negeri 33, Jakarta Barat, tahun 1999. Memperoleh gelar Sarjana Sains dari Institut Pertanian Bogor tahun 2004, gelar Magister bidang Applied Bioscience dari *Ehime University*, Jepang tahun 2011, dan gelar Doktor bidang *Applied Bioresource Sciences* dari *Ehime University*, Jepang tahun 2014.

Mengikuti beberapa pelatihan dan *research exchange* yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: Diklat Prajabatan di Depok (2005), Diklat Fungsional Peneliti Tingkat Pertama dengan peringkat terbaik I di Depok (2006), Diklat Metodologi Penelitian dengan peringkat terbaik I di Bogor (2009), Diklat Fungsional Peneliti Tingkat

Lanjut di Cibinong dengan capaian peringkat terbaik I (2015), Visiting Researcher di *Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University*, Jepang (2015, 2016, 2017, 2018, 2019), Universiti Sains Malaysia (2019), Chulalongkorn University, Thailand (2018), Thermo Fisher Singapura (2018), Nanoport Eindhoven, Belanda (2023), China Academy of Sciences (2023), Texas A&M University, Amerika Serikat (2024).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Bidang Pengelolaan dan Diseminasi Hasil Penelitian di Pusat Penelitian Biomaterial - LIPI (tahun 2016–2018), Plt. Kepala Pusat Penelitian Biomaterial - LIPI (tahun 2018–2019), dan Ketua Kelompok Penelitian Rekayasa Komposit Mikroba (tahun 2022–sekarang).

Jabatan fungsional Peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Muda golongan III/d tahun 2015, Peneliti Ahli Madya golongan IV/a tahun 2017, dan Peneliti Ahli Utama golongan IV/b bidang bioproses tahun 2021.

Menghasilkan 130 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 113 KTI ditulis dalam bahasa Inggris dan 17 dalam bahasa asing lainnya. Menghasilkan 25 paten, di antaranya 3 paten internasional dan 22 paten nasional.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional Peneliti pada BRIN, pembimbing skripsi (S1) pada Institut Pertanian Bogor, Universitas Indonesia, Universitas Padjajaran, Universitas Gadjah Mada, Universitas Brawijaya, Universitas Lambung Mangkurat; pembimbing tesis (S2) pada Institut Pertanian Bogor, Institut Teknologi Bandung, Universitas Indonesia, University Sains Malaysia (Malaysia), dan Chulalongkorn University (Thailand); pembimbing disertasi (S3) pada Institut Teknologi Bandung, Universitas Indonesia, Institut Pertanian Bogor, Universitas Sriwijaya, Kyungpook National University (Republic of

Korea), Chulalongkorn University (Thailand), serta penguji disertasi (S3) pada Institut Pertanian Bogor, University Putra Malaysia (Malaysia), North West University (South Africa); Mentor Pekan Ilmiah Remaja Tingkat Nasional dan Daerah (sejak 2017); Dewan Juri Lomba Karya Ilmiah Remaja–BRIN (2019–2022), Dewan Juri Indonesian Research and Innovation Fair – BRIN (2023–2025).

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu anggota *Japan Wood Research Society* (JWRS) (2009–2014), Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia (MAPEKI) (2015–2019), Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo) (2015–2019), JSPS *Alumni Association of Indonesia* (2017–sekarang), Mikologi Indonesia (MikoINA) (2018–sekarang), Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia (2022–sekarang), Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) (2019–sekarang), dan *Indonesia Structural Biology Association* (ISBA) (2025–sekarang).

Menerima tanda penghargaan *First Winner on Scientific Oral Presentation Award* di Seminar *Japan Wood Research Society* di Hiroshima University Jepang (2011), JSPS HOPE *Fellow* The 5th HOPE *Meeting with Nobel Laurates* di Tokyo Jepang (2013), Satyalancana Karya Satya X Tahun (tahun 2015) dari Presiden RI, *Japan-ASEAN Science, Technology, and Innovation Platform Network Award*, Jepang (Tahun 2015–2025), *Science Technology Research Grant Award* dari *Indonesia Toray Science Foundation* (ITSF) (2021), Satyalancana Karya Satya XX Tahun (2025) dari Presiden RI dan mendapatkan Kenaikan Pangkat Luar Biasa ke Pembina Utama Madya–IV/d dari Presiden RI (2025).

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama, marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 8 Oktober 2026 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

"INOVASI ENZIM LAKASE BERBASIS BIODIVERSITAS INDONESIA SEBAGAI SOLUSI STRATEGIS UNTUK BIOREMEDIASI"

Pada orasi ini, akan disampaikan *state-of-the-art* tentang inovasi enzim lakase sebagai solusi strategis untuk bioremediasi. Karya ilmiah ini berakar pada penemuan (*discovery*) enzim lakase baru Thlacc1 dari biodiversitas Indonesia. Inovasi dikembangkan melalui sistem lakase-mediator, teknik imobilisasi, serta pengungkapan mekanisme degradasi dan detoksifikasi berbasis pendekatan metabolomik dan molekuler. Keseluruhannya diarahkan pada pengembangan aplikasi bioremediasi limbah industri tekstil dan petrokimia yang efektif, aman, adaptif, dan berkelanjutan.

BAB I. PENDAHULUAN

Saat ini, dunia sedang menghadapi tantangan multidimensi yang semakin kompleks dan saling berkaitan, yang dikenal sebagai *triple planetary crisis*, yaitu krisis pencemaran lingkungan, perubahan iklim, dan hilangnya keanekaragaman hayati. Krisis ini telah menimbulkan tekanan besar pada daya dukung dan daya tampung bumi yang berakibat pada penurunan kualitas hidup manusia.

Pencemaran lingkungan dapat terjadi akibat pesatnya pertumbuhan industri modern. Di antara berbagai industri, sektor tekstil dan petrokimia berkontribusi besar dalam menghasilkan limbah toksik yang berpotensi mencemari perairan. Setiap tahunnya, sebanyak 280.000 ton limbah pewarna tekstil dan 2,4 juta ton minyak mentah terbuang ke lingkungan (Wang et al., 2022; Samsuria et al., 2025). Di Indonesia, pencemaran oleh limbah tekstil sering terjadi; salah satunya adalah laporan yang menyebutkan bahwa residu pewarna tekstil telah terdeteksi di salah satu sungai (Alam et al., 2024; Alam et al., 2025). Senyawa-senyawa pencemar tersebut umumnya memiliki struktur kimia yang kompleks dan tahan terhadap proses degradasi alami, sehingga berdampak buruk pada ekosistem dan kesehatan manusia (Andriani et al., 2025).

Dalam upaya menjawab tantangan tersebut, Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) telah merumuskan *Sustainable Development Goals* (SDGs) sebagai komitmen bersama untuk keberlanjutan lingkungan. Salah satunya adalah penyediaan air bersih dan sanitasi layak (SDG 6), konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab (SDG 12), penanganan perubahan iklim (SDG 13), serta perlindungan ekosistem daratan (SDG 15). Di samping itu, platform *Bio-Circular-Green (BCG) Economy* diharapkan mampu mengintegrasikan bioekonomi, sirkularitas, dan teknologi hijau untuk memperkuat ekonomi yang

berkelanjutan. Di Indonesia, tantangan ini dijawab melalui visi Asta Cita Presiden RI, khususnya pada poin ke-5 dan ke-8 yang menekankan hilirisasi dan industrialisasi berbasis riset serta harmoni dengan lingkungan dan alam. Program prioritas pemerintah saat ini berfokus pada rehabilitasi lingkungan dan kemandirian industri berbasis riset untuk memitigasi dampak krisis global. Sejalan dengan itu, dokumen *Indonesian Biodiversity Strategy and Action Plan* (IBSAP) 2025–2045 menegaskan pentingnya pemanfaatan keanekaragaman hayati secara berkelanjutan (Bappenas, 2024). Untuk mewujudkan upaya-upaya ini, temuan inovasi berbasis biodiversitas Indonesia menjadi sangat relevan dan strategis.

Pendekatan bioprospeksi dan bioteknologi telah mendorong pergeseran paradigma teknologi di kalangan masyarakat ilmiah dan industri untuk beralih dari solusi konvensional yang sering kali menghasilkan limbah sekunder menuju solusi yang lebih ramah lingkungan dan berbasis proses biokatalitik. Salah satu pilar utama pendekatan ini adalah penggunaan enzim yang mampu bekerja secara efektif dan menghasilkan produk akhir yang lebih aman secara ekologis. Di antara berbagai enzim yang dipelajari, lakase muncul sebagai biokatalis multifungsi yang prospektif.

Pemanfaatan enzim lakase sebagai *green catalyst* (katalis hijau) menawarkan keunggulan komparatif yang signifikan dibandingkan dengan teknologi konvensional (fisika-kimia) yang selama ini digunakan. Pendekatan fisika-kimia konvensional seperti adsorpsi, filtrasi, dan sedimentasi, serta koagulasi, oksidasi, dan klorinasi telah digunakan untuk mencegah permasalahan polutan di lingkungan, namun metode-metode tersebut terkadang hanya mengubah fase polutan dari satu fase ke fase lainnya dan tidak sepenuhnya mengeliminasi senyawa-senyawa tersebut (Sari, Yanto et al., 2019; Matula, 2024). Enzim lakase mengkatalisis oksidasi berbagai senyawa aromatik dan fenolik tanpa memerlukan kofaktor dan hanya membutuhkan molekul oksigen sebagai penerima elektron dengan

hasil samping berupa air yang nontoksik (Morozova et al., 2007). Sifat reaksi inilah yang kemudian menjadikan lakase maupun organisme penghasilnya dari kelompok jamur pelapuk kayu (JPK) sebagai agen bioremediasi yang berpotensi diaplikasikan secara luas.

Kekayaan biodiversitas Indonesia, khususnya keragaman JPK lokal penghasil lakase, menjadi modal besar bagi bangsa untuk berkontribusi dalam penanganan pencemaran lingkungan secara berkelanjutan. Dengan mengintegrasikan potensi genetik JPK sesuai mandat IBSAP 2025–2045, pengembangan enzim lakase baru berbasis biodiversitas Indonesia menjadi sangat penting, bukan sekadar inovasi laboratorium, melainkan pilar strategis dalam mendukung Asta Cita serta wujud peran bangsa dalam pencapaian SDGs melalui pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Inovasi ini juga mendorong kedaulatan teknologi nasional untuk mengatasi pencemaran lingkungan, sekaligus memposisikan Indonesia sebagai salah satu pusat inovasi global dalam pemanfaatan bioteknologi berbasis biodiversitas.

Oleh karena itu, dalam naskah orasi ini diungkapkan inovasi enzim lakase berbasis biodiversitas Indonesia sebagai solusi strategis untuk bioremediasi. Orasi ini menggabungkan landasan perkembangan dan arah riset lakase ke depan, uraian karya ilmiah yang dihasilkan penulis dalam aspek *discovery*, inovasi, dan aplikasi enzim lakase, ulasan kritis tentang berbagai peluang dan tantangan dalam hilirisasi enzim lakase di Indonesia, serta arah strategis inovasi enzim lakase untuk mendukung hilirisasi dan kemandirian enzim nasional yang selaras dengan pencapaian SDGs, BCG, dan agenda pembangunan nasional.

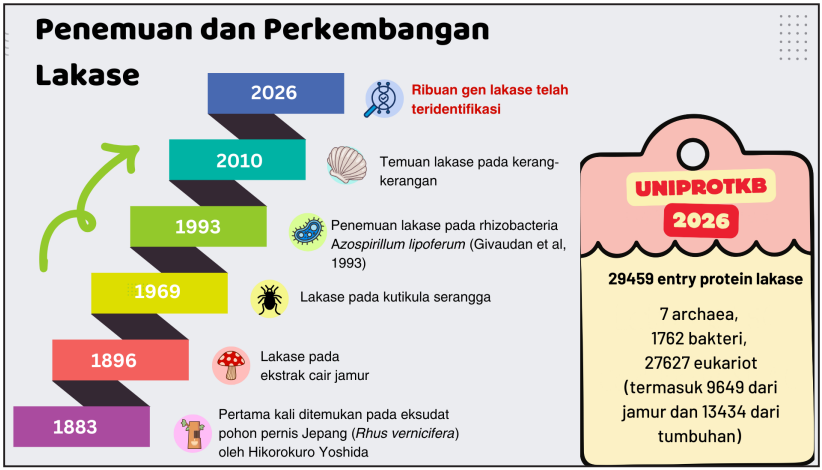
BAB II. PERKEMBANGAN LAKASE DAN ARAH RISET KE DEPAN DALAM BIDANG BIOREMEDIASI

Meskipun telah ditemukan 140 tahun yang lalu, riset enzim lakase terus berkembang. Saat ini, lakase semakin banyak digunakan, terutama dalam bidang bioremediasi. Untuk mengetahui secara detail posisi lakase sejak penemuannya hingga saat ini, berikut akan diuraikan sejarah penemuan enzim lakase, reaksi katalitik lakase, serta perkembangan dan arah riset ke depan dalam bidang bioremediasi.

A. Sejarah Penemuan Lakase

Lakase (EC 1.10.3.2, *p*-diphenol: dioxygen oxidoreductase) pertama kali ditemukan pada eksudat pohon pernis Jepang (*Rhus vernicifera*) oleh Hikorokuro Yoshida pada tahun 1883 (Gambar 2.1), yang menjadikannya salah satu enzim paling awal yang diteliti, dengan sejarah lebih dari 140 tahun (Januzs et al., 2020). Satu dekade setelahnya, pada tahun 1896, lakase dari jamur pertama kali ditemukan (Strong dan Claus, 2011). Penemuan awal lakase dan sifat oksidatifnya mendorong eksplorasinya pada berbagai kingdom organisme. Yamazaki (1969) menemukan jenis fenoloksidase dengan aktivitas mirip lakase pada kutikula serangga yang ditengarai berperan dalam proses pengerasan kutikula serangga. Lakase pada bakteri pertama kali diidentifikasi pada simbion akar tanaman, *Azospirillum lipoferum*, yang diketahui berperan dalam produksi melanin (Givaudan et al., 1993). Bukti pertama lakase pada kerang-kerangan dilaporkan oleh Luna-Acosta et al. (2010), yang berhasil mengidentifikasi lakase dalam cairan plasma sebagai bagian dari sistem imun yang berperan dalam melawan patogen. Penemuan-penemuan ini memperkuat dugaan bahwa lakase merupakan salah satu enzim yang paling penting dalam sistem metabolisme organisme.

Sejak penemuannya pada tahun 1883, ribuan gen lakase telah teridentifikasi dari berbagai spesies organisme. Pencarian terbaru dalam database UniProtKB mengungkap setidaknya ada 29459 entri protein lakase dengan rincian data 7 archaea, 1762 bakteri, dan 27627 eukariota (termasuk 9649 dari jamur dan 13434 dari tumbuhan) (UniProtKB, diakses 21/01/2026). Peningkatan jumlah tersebut sebagian besar disebabkan oleh kemajuan teknologi genomik dan bioinformatika yang memungkinkan identifikasi menggunakan anotasi sekuen DNA genom, dan juga mencerminkan meningkatnya minat terhadap lakase di berbagai bidang dari tahun ke tahun.

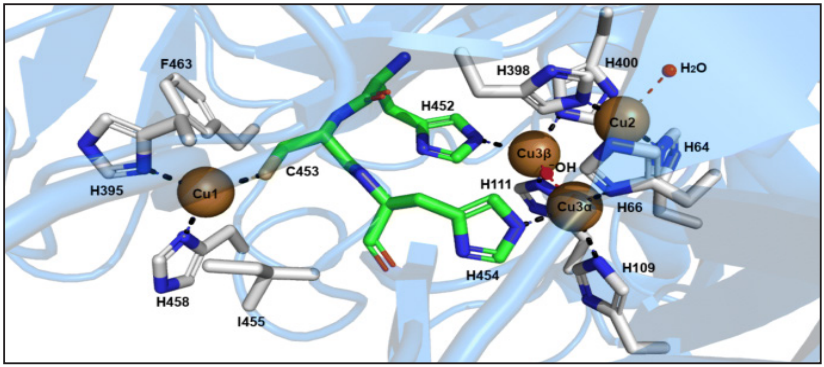


Gambar 2.1 Penemuan dan perkembangan enzim lakase

B. Karakteristik Katalitik Lakase

Lakase merupakan biokatalis hijau yang unik. Keunikannya terletak pada kemampuannya mengoksidasi substrat aromatik hanya dengan satu molekul oksigen dan menghasilkan air sebagai produk samping.

Secara molekuler, aktivitas katalitiknya terdapat pada 4 atom tembaga dalam tiap monomer lakase, yaitu 1 buah Cu tipe 1 (tempat pengikatan substrat), 1 buah Cu tipe 2, dan 2 buah Cu tipe 3 (Gambar 2.2). Pada proses katalitiknya, terjadi transfer elektron dari Cu tipe 1 ke Cu tipe 2 dan Cu tipe 3 yang mereduksi oksigen menjadi air dalam kompleks *trinuclear copper cluster* (Arregui et al., 1999).



Sumber: Arregui et al., 2019

Gambar 2.2 Representasi asam amino pada situs katalitik lakase *Trametes versicolor* (PDB 1KYA). Asam-asam amino penyusun jalur histidin-sistein ditampilkan dalam warna hijau.

Secara elektrokimia, lakase diklasifikasikan menjadi 3 kelompok berdasarkan potensial redoks pada situs T1 ($E^{0'}_{T1}$), yaitu lakase dengan potensial redoks rendah (*low*), sedang (*medium*), dan tinggi (*high*) (Mate dan Alcalde, 2015) (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Potensial redoks pada T1 lakase ($E^{0\prime}T1$) pada berbagai organisme dan sekuen asam amino penyandinya (Mate dan Alcalde, 2015)

Sumber Lakase	Organisme	Sumber Sequence	Potensial Redoks	Aligment Sequence
HRPL				
Trametes achracea	Basidiomycete	PDB 2HZH	+790 ± 10	^{452}HCHIDFHLEAGF^{463}
Trametes trogii	Basidiomycete	PDB 2HRH	+790	^{449}HCHIDFHLEAGF^{460}
Trametes versicolor	Basidiomycete	PDB 1GYC	+785	^{452}HCHIDFHLEAGF^{463}
Botrytis cinerea	Ascomycete	CCD45861.1	+780	^{508}HCHIAWHASEGL^{463}
Coriolopsis fulvocinerea	Basidiomycete	n.d	+780 ± 10	n.d
Trametes hirsuta	Basidiomycete	AAA33103.1	+780 ± 10	^{452}HCHIDFHLDAGF^{463}
Trametes villosa	Basidiomycete	AAC41686.1	+780	^{452}HCHIDFHLEAGF^{463}
Basidiomycete PM1	Basidiomycete	CAA78144.1	+759	^{449}HCHIDFHLEAGF^{460}
Cerrena maxima	Basidiomycete	UP D0VWU3.1	+750 ± 5	^{452}HCHIDFHLEGGF^{463}
Pycnoporus cinnabarinus	Basidiomycete	AAC39469.1	+750	^{450}HCHIDFHLEAGF^{461}
Trametes pubescens (LAC1)	Basidiomycete	AAM18408.1	+746 ± 5	^{457}HCHIDFHLEAGF^{468}
Pleurotus ostreatus (POXC)	Basidiomycete	PRF 1587216	+740	^{460}HCHIDWHLEIGL^{471}
Trametes pubescens (LAC2)	Basidiomycete	AAM18407.1	+738 ± 5	^{452}HCHIDFHLEAGF^{463}
Trametes sp.C30 (LAC1)	Basidiomycete	AAF06967.1	+730	^{449}HCHIDFHLEAGF^{460}
Botrytis aclada	Ascomycete	AFC76164.1	+720	^{525}HCHIAWHASEGL^{536}
MRPL				
Rhizoctonia solani	Basidiomycete	UP Q02081.1	+710	^{459}HCHIDWHLEAGL^{470}
Rigidoporus lignosus	Basidiomycete	PDB 1V10	+700	^{472}HCHIDWHLEAGL^{483}
Trichoderma harzianum WL1	Ascomycete	n.d	+692	n.d
Pleurotus ostreatus (POXA1b)	Basidiomycete	CAA06292.1	+650	^{450}HCHIDWHLDLGF^{461}
Trametes sp. C30 (LAC2)	Basidiomycete	AAM66348.1	+560	^{452}HCHIDFHLEAGF^{463}
Coprinus cinereus	Basidiomycete	PDB 1A65	+550	^{451}HCHIEFHLMNGL^{462}
Trichophyton rubrum LKY-7	Ascomycete	EGD86557.1	+540	^{530}HCHIAWHSSQGL^{541}

Sumber Lakase	Organisme	Sumber Sequence	Potensial Redoks	Aligment Sequence
Trametes sp.C30 (LAC3)	Basidiomycete	AAR00925.1	+530	^{452}HCHIDFHLDAGF^{463}
CueO from *Escherichia coli*	Bacteria	PDB 2FQG	+500[a]	^{471}HCHLLEHEDTGM^{482}
Scytalidium thermophilum	Ascomycete	Barka et al. (1995)	+510	^{506}HCHIAWHVSGGL^{517}
Melanocarpus albomyces	Ascomycete	PDB 1GW0	+470	^{502}HCHIAWHVSGGL^{513}
Myceliophthora thermophila	Ascomycete	ADA41449.1	+470	^{502}HCHIAWHVSGGL^{513}
LRPL				
CotA from *Bacillus subtilis*	Bacteria	PDB 1GSK	+455	^{491}HCHILEHEDYDM^{502}
CueO from *Eacherichia coli*	Bacteria	PDB 2FQG	+440[b]	^{471}HCHLLEHEDTGM^{482}
Rhus vernicifera	Plant	BAB63411.2	+434	^{495}HCHFERHTTEGM^{506}
SLAC from *Streptomyces coelicolor*	Bacteria	UP Q9XAL8	+430	^{287}HCHVQSHSDMGM^{298}
McoP from *Pyrobaculum aerophilum*	Bacteria	PDB 3AW5	+398	^{430}HCHNLEHEDGGM^{441}
Ssl1 from *Streotomyces sviceus*	Bacteria	PDB 4M3H	+375 ± 8	^{284}HCHVQSHSDMGM^{295}

Lakase dari bakteri dan tumbuhan berada dalam kelompok lakase berpotensial redoks rendah (*low-redox potential laccase*/ LRPL), dengan $E^{0'}_{T1}$ di bawah +460 mV *vs.* NHE (*Normal Hydrogen Electrode*) dan metionin sebagai residu ligan aksial pada T1. Sedangkan lakase dari jamur memiliki potensial redoks rendah hingga tinggi. Kelompok lakase dengan potensial redoks sedang (*medium-redoks potential laccase*/MRPL) termasuk lakase dari *Basidiomycetes* dan *Ascomycetes* memiliki $E^{0'}_{T1}$ antara +460 dan +710 mV *vs.* NHE dan leusin sebagai ligan aksialnya. Laccase dengan potensial redoks tinggi (*high-redoks potential laccase*/HRPL) umumnya dihasilkan oleh jamur pelapuk kayu (JPK) dari kelompok *Basidiomycetes* dengan

$E^{0'}_{T1}$ berkisar antara +730 hingga +790 mV *vs.* NHE dan fenilalanin sebagai ligan aksialnya.

Kelompok HRLP lebih berpotensi diaplikasikan dalam industri karena potensial redoksnya yang tinggi, sehingga dapat mengoksidasi substrat secara lebih luas dibandingkan dengan kelompok LRPL dan MRPL. Oleh karena itu, pencarian enzim lakase dengan nilai potensial redoks tinggi dari JPK menjadi strategi penting dalam bioremediasi lingkungan.

C. Perkembangan Lakase dalam Bidang Bioremediasi

Upaya untuk memperoleh solusi atas berbagai permasalahan lingkungan menjadi salah satu pendorong utama berkembangnya teknik-teknik bioremediasi. Bioremediasi menggunakan enzim dianggap sebagai solusi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan teknik konvensional lainnya.

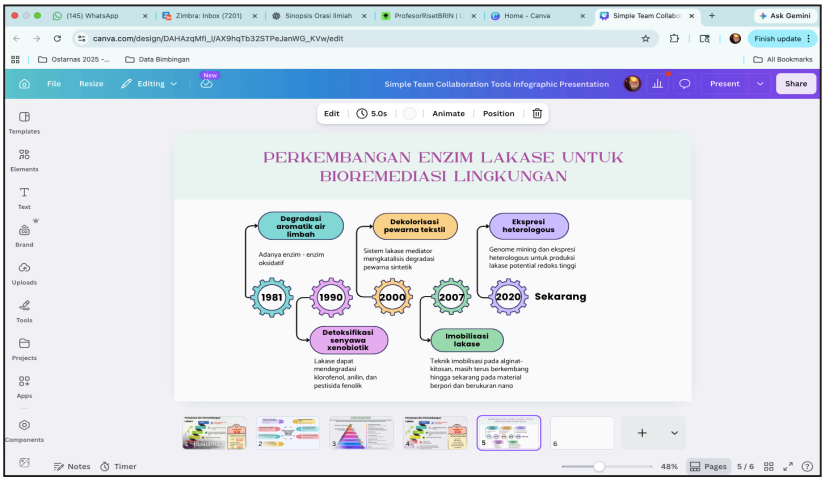
Indikasi pertama yang membuktikan bahwa lakase dapat digunakan dalam pengelolaan limbah pencemar muncul pada tahun 1981, ketika Alberti dan Klibanov (1981) melaporkan keberhasilan proses degradasi senyawa aromatik terlarut dalam limbah industri menggunakan enzim-enzim oksidatif (Gambar 2.3). Studi ini menjadi salah satu yang pertama kali mengaitkan hubungan eksperimental antara enzim oksidatif dan remediasi limbah cair industri.

Pada tahun 1990-an, lakase telah dikenal memiliki kemampuan untuk mendetoksifikasi berbagai senyawa xenobiotik sederhana (Gianfreda et al., 1999). Periode ini menandai transformasi aplikasi lakase untuk detoksifikasi lingkungan yang tercemar.

Pada awal tahun 2000-an, penggunaan lakase untuk dekolorisasi pewarna tekstil mulai muncul. Studi membuktikan lakase sebagai enzim utama yang mampu mengkatalisis degradasi oksidatif pewarna sintetik seperti azo, antrakuinon, dan trifenilmetana (Abadulla et al.,

2000). Pada dekade yang sama, perkembangan *laccase-mediator systems* (LMS) secara signifikan memperluas jenis substrat yang dapat dioksidasi oleh lakase (Crestini et al., 2003).

Dalam upaya pengembangan enzim lakase untuk diaplikasikan pada limbah tekstil, penelitian imobilisasi lakase mulai berkembang sejak 2007 menggunakan mikrokapsul alginat/kitosan untuk dekolorisasi pewarna tekstil (Lu et al., 2007). Hingga kini, riset-riset imobilisasi lakase pada berbagai material masih terus berkembang, terutama pada material berpori dan berukuran nano.



Gambar 2.3 Perkembangan lakase dalam bidang bioremediasi lingkungan

Perkembangan terkini dalam teknologi genomik, ekspresi rekombinan, dan rekayasa protein telah memperlebar cakupan bioremediasi berbasis lakase. Teknologi seperti *genome mining* dan ekspresi heterolog memungkinkan produksi lakase dengan peningkatan potensial redoks yang tinggi, stabilitas yang baik, serta

peningkatan spesifisitas untuk diaplikasikan pada lingkungan dalam skala besar (Jia et al., 2022).

D. Superior Lakase dari Jamur Pelapuk Kayu (JPK)

Luasnya pemanfaatan lakase di berbagai bidang mendorong eksplorasi dan isolasi lakase dari berbagai organisme, seperti bakteri, fungi, tanaman, dan invertebrata. Namun, menurut Baldrian (2006), jamur *Basidiomycetes* lebih sering dijadikan sebagai sumber lakase. Hal ini dikarenakan kelompok jamur *Basidiomycetes* menghasilkan lakase dengan potensial oksidasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok organisme lain (Mate dan Alcade, 2015). Lakase yang paling banyak digunakan dan diteliti berasal dari JPK (Bertrand et al., 2016; Andriani et al., 2020).

JPK umumnya memiliki beberapa gen penyandi lakase dalam genomnya. Gen-gen tersebut membentuk famili multigen yang mengode protein dengan kemiripan sekuen penuh atau hanya terbatas pada domain tertentu (Kües dan Rühl, 2011; Giardina et al., 2010). Ekspresi gen-gen tersebut diregulasi oleh keberadaan ion logam, di antaranya ion Cu^{2+} yang diketahui meregulasi transkripsi gen-gen lakase pada beberapa JPK (Pezzella et al., 2013). Beberapa gen lakase jamur *Basidiomycetes* dari genus *Trametes* yang berhasil diidentifikasi adalah 5 gen lakase dari *Trametes villosa* (Yaver et al., 1996) dan *Trametes* sp. 420 (Tong et al., 2007), 4 gen dari *T. versicolor* UAMH 8272 (Fujihiro et al., 2009), serta 7 gen dari *T. hirsuta* 072 (Savinova et al., 2019).

E. Arah Riset ke Depan dalam Bidang Bioremediasi

Berdasarkan perkembangan riset lakase di atas, problem utama dalam bioremediasi ke depan adalah memperoleh lakase unggul yang mampu mendegradasi dan mendetoksifikasi berbagai jenis cemaran.

Oleh karena itu, arah riset ke depan memerlukan pendekatan terpadu, mulai dari bioprospeksi untuk menemukan varian lakase baru yang unggul, khususnya dari jamur pelapuk kayu, optimalisasi aktivitas katalitiknya melalui pengembangan sistem lakase-mediator guna memperluas spektrum degradasi senyawa kompleks, hingga inovasi imobilisasi untuk meningkatkan stabilitas, efisiensi, dan reusabilitas enzim dalam sistem pengolahan limbah yang berkelanjutan. Aplikasi lakase untuk bioremediasi ke depan juga diharapkan dapat berkembang untuk polutan lainnya, seperti cemaran antibiotik, limbah rumah sakit, limbah industri pangan, cemaran toksin pada makanan, pestisida, serta cemaran organik lainnya, baik di perairan darat maupun laut.

Lebih jauh lagi, arah riset lakase untuk bioremediasi memerlukan integrasi multidisiplin, seperti pendekatan metabolomik, bioinformatika, dan pemodelan molekuler untuk mengungkap jalur degradasi dan mekanisme detoksifikasi secara lebih mendalam. Hal ini penting untuk memastikan bahwa proses bioremediasi tidak hanya efektif, tetapi juga aman karena menghasilkan produk akhir yang tidak beracun.

Pada tahap hilirisasi, riset perlu diarahkan pada pengembangan sistem bioreaktor dan implementasi skala industri, sehingga teknologi lakase dapat diadopsi secara luas dalam instalasi pengolahan air limbah, sekaligus mendukung transisi menuju industri hijau berbasis bioteknologi.

BAB III. INOVASI LAKASE UNTUK BIOREMEDIASI LINGKUNGAN

Pada bab ini, akan diuraikan esensi karya ilmiah penulis mulai dari aspek *discovery*, inovasi, dan aplikasi lakase sebagai solusi atas problem utama bioremediasi lingkungan di masa kini dan masa depan.

A. Esensi Karya Ilmiah Penulis

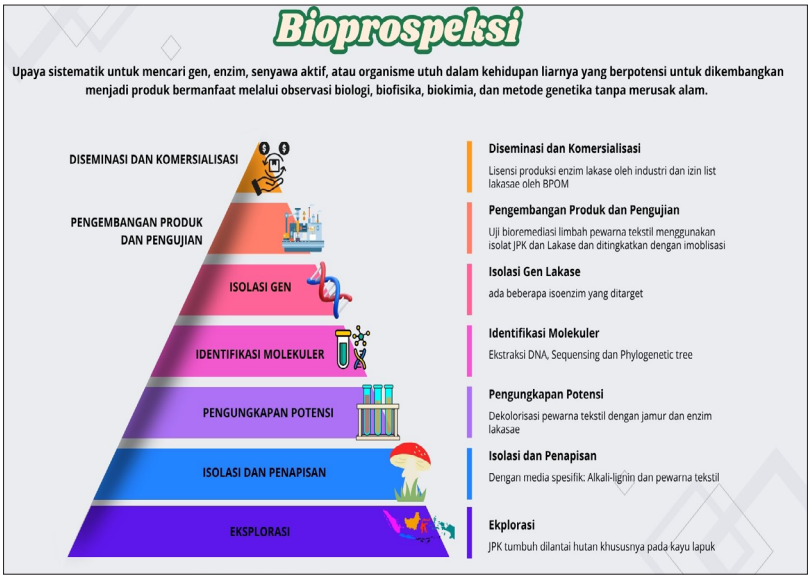
Esensi karya ilmiah ini berakar pada aspek *discovery* melalui keberhasilan mengungkap enzim lakase baru, Thlacc1, dari biodiversitas Indonesia sebagai respons terhadap tantangan utama bioremediasi, yaitu keterbatasan enzim yang mampu bekerja secara efektif terhadap beragam cemaran yang kompleks. Pendekatan bioprospeksi yang terarah tidak hanya menghasilkan kandidat enzim unggul dengan karakteristik katalitik yang kuat, tetapi juga memperkaya khazanah sumber daya genetik nasional yang memiliki nilai strategis bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi berbasis biodiversitas.

Pada tataran inovasi, karya ini menghadirkan integrasi solusi yang komprehensif melalui pengembangan sistem lakase-mediator untuk memperluas spektrum degradasi senyawa resisten, serta inovasi teknik imobilisasi lakase guna meningkatkan stabilitas, efisiensi, dan tingkat penggunaan berulang dalam proses bioremediasi. Inovasi ini tidak berdiri sendiri, melainkan diperkuat oleh pengungkapan jalur degradasi dan mekanisme detoksifikasi secara *in vitro* melalui pendekatan metabolomik, serta secara *in silico* melalui pendekatan molekuler, sehingga memberikan landasan ilmiah yang kokoh untuk memastikan bahwa proses yang terjadi tidak hanya efektif dalam mendegradasi cemaran, tetapi juga aman bagi lingkungan.

Lebih lanjut, aspek aplikasi karya ini tercermin pada potensi implementasi nyata dalam pengolahan limbah industri, khususnya limbah tekstil dan petrokimia, melalui sistem bioremediasi berbasis enzim yang adaptif dan berkelanjutan.

B. Bioprospeksi Enzim Lakase untuk Bioremediasi

Dalam kaitannya dengan pencarian enzim lakase unggul dari jamur pelapuk kayu (JPK), kegiatan bioprospeksi yang telah dilakukan oleh penulis bersama tim meliputi: 1) eksplorasi, 2) isolasi dan penapisan, 3) pengungkapan potensi, 4) identifikasi biomolekuler, 5) isolasi gen, 6) pengembangan produk dan pengujian, serta 7) diseminasi dan komersialisasi (Gambar 3.1).



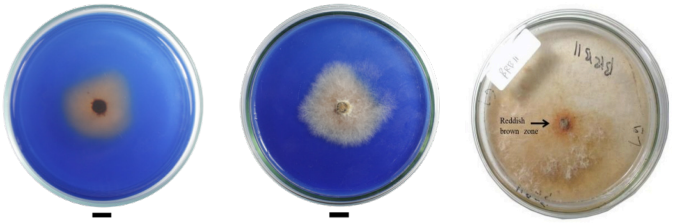
Gambar 3.1 Bioprospeksi enzim lakase dari JPK asli Indonesia telah dilakukan oleh penulis sejak 2015–sekarang

Kegiatan eksplorasi JPK untuk bioremediasi lingkungan, khususnya untuk biodegradasi pewarna tekstil, telah dilakukan sejak 2015 melalui beberapa kegiatan seperti *Indonesian Biodiversity Strategic Action Plan* (IBSAP 2015–2020) di Taman Eden 100, Toba-Samosir, dan *Man and Biosphere* (MAB) UNESCO *Research Fund* 2019 di Taman Nasional Berbak–Sembilang. Selama program tersebut, telah diperoleh sebanyak 283 sampel badan buah JPK dan telah dilakukan proses isolasi serta penapisan di laboratorium, yang menghasilkan beberapa isolat JPK berpotensi.

Teknik isolasi dan penapisan JPK penghasil lakase telah berhasil dikembangkan melalui 2 tahap, yaitu 1) menggunakan media selektif campuran alkali lignin–guaiakol dan 2) menggunakan media yang mengandung campuran lignin–pewarna. Aktivitas lakase yang tinggi menyebabkan pembentukan zona cokelat kemerahan pada media agar campuran alkali lignin–guaiakol (Anita et al., 2011) dan pembentukan zona bening pada media agar campuran lignin–pewarna (Nurhayat et al., 2022).

Pada kegiatan eksplorasi dan isolasi JPK dari Taman Eden 100, Toba-Samosir tahun 2018, diperoleh 175 sampel badan buah JPK dan 25 di antaranya mampu ditumbuhkan pada media agar (Nurhayat et al., 2021). Dari 25 isolat murni tersebut, 6 isolat menunjukkan kemampuan membentuk zona bening pada media agar yang mengandung campuran lignin dan pewarna *Remazol Brilliant Blue R* (RBBR). (Anita et al., 2022a). Dari 108 JPK yang dikoleksi dari Taman Nasional Berbak–Sembilang, sebanyak 22 isolat mampu tumbuh pada media alkali lignin–guaiacol, dan 13 di antaranya menunjukkan zona cokelat kemerahan di sekitar miselia jamur (Nurhayat et al., 2022). Zona cokelat kemerahan di sekitar miselia jamur mengindikasikan bahwa isolat tersebut mampu memproduksi lakase yang dapat mengoksidasi lignin dan guaiakol dalam media alkali lignin selama proses pertumbuhannya. Pada tahapan penapisan selanjutnya, dari 13 isolat yang positif, hanya 3 isolat yang mampu tumbuh dan membentuk zona

bening pada media yang mengandung campuran lignin dan pewarna RBBR (Nurhayat et al., 2022**).** Penampakan keberhasilan isolasi dan penapisan JPK penghasil lakase ditunjukkan pada Gambar 3.2.



(a) (b) (c)

Gambar 3.2 Hasil pengamatan zona cokelat kemerahan di sekitar isolat yang ditumbuhkan pada media alkali-lignin, yang menunjukkan potensi penghasil lakase (a), serta penapisan JPK pada media RBBR-lignin untuk mengetahui potensi JPK dalam mendekolorisasi pewarna RBBR (b dan c)

Yanto dan Tachibana (2013) juga sebelumnya pernah melakukan isolasi dan penapisan JPK yang berpotensi untuk biodegradasi hidrokarbon petroleum dengan cara menumbuhkan badan buah jamur pada media agar yang mengandung minyak mentah. Dari 72 isolat yang berhasil diambil, terdapat 5 isolat yang berpotensi dalam mendegradasi minyak mentah, di antaranya *Pestalotiopsis* sp. NG007. Anita et al., (2018) melaporkan 2 isolat baru (M3 dan H18) dari Kebun Raya Daerah Batam, dan 2 isolat SB6 dan GP1 dari Kebun Raya Daerah Kuningan, Jawa Barat berpotensi mendekolorisasi pewarna tekstil antrakuinon.

Temuan teknik isolasi dan penapisan JPK penghasil lakase unggul merupakan hal penting yang mendorong pengungkapan potensi JPK penghasil lakase untuk aplikasi bioremediasi lingkungan.

C. Pengungkapan Potensi dan Identifikasi Biomolekuler

Pengungkapan potensi JPK untuk bioremediasi pewarna tekstil telah berhasil dilakukan oleh penulis, melalui dua pendekatan, yaitu 1) menguji kemampuan JPK dalam mendekolorisasi pewarna dan 2) menguji aktivitas enzim lakasenya selama proses degradasi.

Melalui dua pendekatan ini, 6 isolat terbaik, yaitu, EDN 050, EDN 082, EDN 084, EDN 085, EDN 114, dan EDN 134, yang diperoleh dari Taman Eden 100 menunjukkan potensi kemampuan dalam degradasi 4 jenis pewarna, yaitu 2 jenis pewarna antrakuinon (*Remazol Brilliant Blue R* (RBBR) dan *Acid Blue* 129 (AB129)), dan 2 jenis pewarna azo (*Acid Orange* 7 (AO7) dan *Reactive Black* 5 (RB5)) pada konsentrasi 100 ppm dalam media cair dengan laju dekolorisasi 78–99% dan menghasilkan enzim lakase hingga 0,26 U/mL selama degradasi (Anita, Ardiati et al., 2022). Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh 3 isolat terbaik dari Taman Nasional Berbak-Sembilang, yaitu BRB 11, BRB 73, dan BRB 81, yang telah menunjukkan kemampuan dalam dekolorisasi 51–60% pewarna RBBR dan 56–91% pewarna AB129, serta 22–78% untuk RB5 dan 14–38% untuk AO7 dengan aktivitas lakase hingga 0,12 U/mL (Nurhayat et al., 2022).

Identifikasi secara morfologis dan molekuler terhadap isolat JPK dari Taman Eden 100 diperoleh bahwa 6 isolat terpilih tersebut adalah *Trametes hirsuta* EDN 082, *Trametes hirsuta* EDN 084, *Trametes hirsuta* EDN 085, *Trametes pavonia* EDN 134, *Deconica caprophila* EDN 114, dan *Perenniporia subtephropora* EDN 050. Dari Taman Nasional Berbak-Sembilang, diperoleh tiga isolat JPK terpilih, yaitu *Ceriporia lacerate* BRB 81, *Leiotrametes menziesii* BRB 73, dan *Phellinus noxius* BRB 11.

Selain untuk dekolorisasi pewarna jenis antrakuinon dan azo, JPK *Leiotrametes menziesii* BRB 73 dan *Phellinus noxius* BRB 11 juga telah diungkapkan potensinya untuk dekolorisasi campuran pewarna jenis *Direct* yang biasa digunakan oleh pengrajin jumputan di

Sumatra Selatan. Isolat BRB 73 dan BRB 11 mampu mendekolorisasi campuran pewarna *Direct Turquoise*, *Direct Orange*, dan *Direct Yellow* sebesar 61,4% dan 60,7% berturut-turut dengan aktivitas enzim lakase mencapai 0,5 U/mL (Apriani et al., 2024; Apriani et al., 2025).

Selain JPK yang diisolasi dari Taman Eden 100 dan Taman Nasional Berbak–Sembilang, kegiatan pengungkapan potensi kemampuan JPK dalam dekolorisasi pewarna tekstil juga dilakukan pada isolat JPK dari Kawasan Hutan Laiwangi–Wanggameti, Taman Nasional Matalawa, Pulau Sumba, Nusa Tenggara Timur pada 2016. Satu isolat yang berpotensi (*Cymatoderma dendriticum* WM01) memiliki kemampuan dekolorisasi pewarna RBBR, AB129, dan RB5 masing-masing sebesar 23%, 82%, dan 6% dalam media cair selama 3 hari, serta menghasilkan enzim lakase sebesar 0,21 U/mL ketika ditambahkan ekstrak daun jati untuk meningkatkan aktivitas lakase (Oktaviani et al., 2021).

JPK *Trametes hirsuta* D7 yang diisolasi dari lahan gambut di Riau, serta *Ceriporia* sp. BIOM 3 yang diisolasi dari Kawasan Cibinong Science Center, *Trametes sanguinea* M3, *Trametes polyzona* H18, dan *Neofomitella guangxiensis* GP1 yang diisolasi dari Kebun Raya Batam juga memiliki potensi untuk mendekolorisasi pewarna tekstil serta menghasilkan enzim lakase (Oktaviani dan Yanto, 2015; Anita et al., 2021; Ramadhan et al., 2021). Sebelumnya, Yanto et al. (2014) menguji isolat jamur *Pestalotiopsis* sp. NG007 memiliki kemampuan dekolorisasi terhadap pewarna *Reactive Green* 19, *Reactive Orange* 64, dan *Reactive Red* 4 sebesar 20–98% selama 3 hari pada rentang pH 3–12 dan salinitas 0–10% (w/v).

Untuk membuktikan bahwa enzim lakase berperan dalam proses degradasi, penulis juga telah menguji potensi lakase dalam biodekolorisasi pewarna tekstil. Lakase dari *T. hirsuta* D7 dengan aktivitas 0,25–0,4 U/mL efektif mendekolorisasi pewarna RBBR sebesar 96–100% dalam 7 jam reaksi (Anita et al., 2019). Enzim

lakase dari isolat *C. dendriticum* WM01 dan *Ceriporia* sp. BIOM3 mampu mendekolorisasi pewarna sintetik (Sari, Tahar et al., 2019). Enzim lakase dari isolat *T. hirsuta* EDN 082, *T. hirsuta* EDN 084 dan *T. pavonia* EDN 134 telah berhasil diisolasi dan diungkap potensinya dalam mendekolorisasi berbagai pewarna tekstil (Yanto et al., 2019; Nurhayat et al., 2020; Ningsih, et al., 2020; Anita, Ningsih et al., 2022; Oktaviani et al., 2023).

Selain mampu mendekolorisasi pewarna sintetis, JPK dan enzim lakase terbukti mampu dalam bioremediasi air limbah tekstil dari salah satu industri tekstil di Bekasi (Ardiati et al., 2022), air limbah batik di Klaten (Yanto et al., 2021), dan air limbah batik printing di Pekalongan (Yanto et al., 2023), degradasi cemaran minyak mentah (Yanto dan Tachibana, 2013; Yanto dan Tachibana, 2014a; Yanto et al., 2017; Yanto and Hidayat, 2020), degradasi aspal (Yanto dan Tachibana, 2014b), degradasi hidrokarbon poliaromatik fenantrena (Hidayat dan Yanto, 2018), campuran fenantrena, antrasena dan benzo[a]pirena (Zalkifal et al., 2025), degradasi *styrofoam* (Yanto et al., 2019), degradasi 14-dioksan (Sari et al., 2023), degradasi polistirena (Karimah et al., 2025), degradasi lignin dari limbah lignoselulosa (Ermawar et al., 2006; Maulita et al., 2025), dan antibiotik siprofloksasin (Pattu et al., 2024; Oktaviani et al., 2026). Berdasarkan semua temuan di atas, terbukti bahwa JPK dan enzim lakase asli Indonesia yang dihasilkan berperan penting dalam bioremediasi lingkungan.

Melalui kegiatan bioprospeksi, beberapa isolat unggul telah diidentifikasi dan dikarakterisasi potensinya untuk menghasilkan enzim lakase dengan aktivitas tinggi, sebagaimana tercantum pada Tabel 3.1.

Di antara JPK tersebut, *T. hirsuta* EDN 082 dan *T. hirsuta* D7 memiliki potensi terbaik dan layak untuk diteliti lebih lanjut. Temuan JPK asli dari biodiversitas Indonesia telah memberikan kontribusi positif bagi perkembangan riset bioremediasi dan memperkaya

database biodiversitas Indonesia di dunia, yang dibuktikan dengan penambahan *database* pada NCBI MT476912.1 untuk *T. hirsuta* EDN 082 dan KX444204.1 untuk *T. hirsuta* D7.

D. Temuan Lakase Baru Asli Indonesia

Penelitian yang dilakukan oleh penulis telah berhasil mengidentifikasi salah satu gen penyandi lakase baru (*Thlacc1*) dari transkriptom *T. hirsuta* EDN 082 menggunakan pendekatan *reverse transcriptase* PCR (Ilham et al., 2026). Gen tersebut diekspresikan dalam sistem heterolog inang uniseluler, yaitu *Pichia pastoris* BG11 ΔAOX1, yang mampu mengekspresikan protein rekombinan di bawah kontrol promoter AOX1 dengan penginduksi metanol.

Tabel 3.1 JPK unggul penghasil lakase asli Indonesia yang berhasil diisolasi selama proses bioprospeksi

No	Lokasi sampling	Isolat unggul	Potensi
1	Taman Eden 100, Toba-Samosir, Sumatera Utara	*Trametes hirsuta* EDN 082	Degradasi pewarna tekstil, limbah industri batik dan tekstil, lignin, degradasi antibiotik
2		*Trametes hirsuta* EDN 084	Degradasi pewarna tekstil
3		*Trametes hirsuta* EDN 085	Degradasi pewarna tekstil
4		*Trametes pavonia* EDN 134	Degradasi pewarna tekstil
5		*Deconica caprophila* EDN 114	Degradasi pewarna tekstil
6		*Perenniporia subtephropora* EDN 050	Degradasi pewarna tekstil

No	Lokasi sampling	Isolat unggul	Potensi
7	Taman Nasional Berbak-Sembilang	*Ceriporia lacerate* BRB 81	Degradasi pewarna tekstil
8		*Leiotrametes menziesii* BRB 73	Degradasi pewarna tekstil, Jumputan
9		*Phellinus noxius* BRB 11	Degradasi pewarna tekstil, hidrokarbon poliaromatik
10	Rawa Gambut Riau	*Trametes hirsuta* D7	Degradasi pewarna tekstil, limbah industri batik dan tekstil, degradasi antibiotic, degradasi lignin, PAH, minyak mentah, antibiotic, dll
11	Kebun Raya Batam	*Trametes sanguinea* M3	Degradasi pewarna tekstil
12		*Trametes polyzona* H18	Degradasi pewarna tekstil
13		*Neofomitella guangxiensis* GP1	Degradasi pewarna tekstil
14	KST Soekarno	*Ceriporia sp.* BIOM3	Degradasi pewarna tekstil
15	Taman Nasional Laiwangi - Wanggameti	*Cymatoderma dendriticum* WM01	Degradasi pewarna tekstil

Hasil BLASTp sekuen asam amino Thlacc1 yang berhasil diisolasi memiliki kemiripan dengan lakase 3 (AOX15704.1) sebesar 98,47% dan lakase 6 (WDI23427.1) sebesar 98,09%, yang termasuk dalam

kelompok lakase minor F. Hasil alignment Thlacc1 dengan lakase 6 menunjukkan perbedaan 10 asam amino berupa 182N → 182S, 185V → 185L, 264F → 264L, 285V → 285M, 293P → 293Q, 309A → 309T, 331S → 331T, 335S → 335T, 356M → 356L, dan 473G→473D. Sedangkan penjajaran dengan lakase 3 menunjukkan 4 perbedaan asam amino, yaitu 182N → 182S, 285V → 285M, 495E → 495D, dan 497N → 497S. Perbedaan asam amino tersebut menjadi keunikan Thlacc1 sebagai lakase dari *T. hirsuta* yang baru ditemukan. Gen lakase *Thlacc1* telah rilis pada *database GenBank* NCBI dengan nomor akses PX998023.1 dan protein lakase Thlacc1 dengan nomor akses YEL86077.1.

E. Pengembangan Sistem Lakase-Mediator

Lakase secara alami hanya mampu mengoksidasi substrat dengan potensial redoks rendah hingga menengah, terutama senyawa fenolik. Padahal, beberapa cemaran mengandung senyawa nonfenolik, memiliki potensial redoks tinggi, atau memiliki hambatan sterik karena ukurannya besar, seperti lignin dan limbah tekstil. Keterbatasan inilah yang memunculkan kebutuhan akan "perpanjangan tangan" lakase. Dari sinilah muncul istilah sistem lakase-mediator. Beberapa molekul kecil (mediator) dapat dioksidasi oleh lakase dan menghasilkan radikal stabil yang dapat menyerang senyawa pada bagian nonfenolik dari cemaran.

Penulis telah mengembangkan sistem lakase-mediator menggunakan lakase dari JPK asli Indonesia untuk mendegradasi berbagai jenis pewarna tekstil. Penambahan mediator *violuric acid* (VA) (1%) mampu meningkatkan kemampuan lakase dalam degradasi pewarna hingga 30 kali dibandingkan dengan enzim bebasnya (Yanto et al., 2019). Penambahan vanillin sebagai mediator alami meningkatkan kemampuan enzim lakase *T. hirsuta* EDN 082 sebagai antibakteri pada prototipe penyanitasi tangan yang dibuat (Anita, Asishe et al., 2022).

Penambahan *2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid* (ABTS) sebagai mediator pada enzim lakase dari *Salipiger* sp. CCB-MM3 meningkatkan dekolorisasi beberapa pewarna antrakuinon, azo dan triarilmetana (Ramadhan et al., 2025).

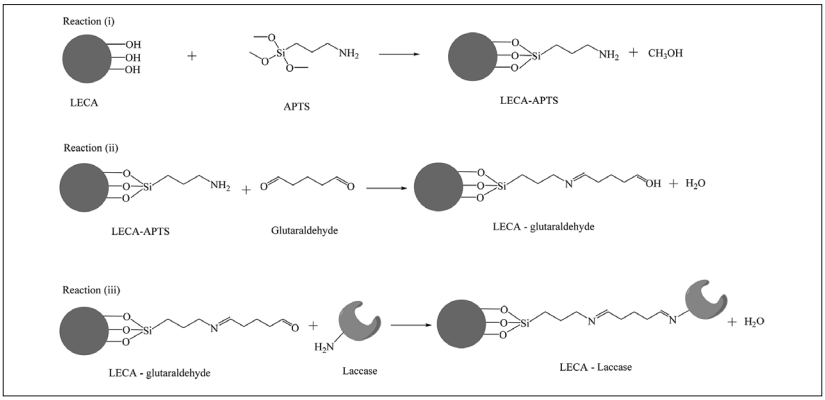
Temuan sistem lakase-mediator dengan beberapa jenis mediator ini telah memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan kemampuan enzim lakase untuk bioremediasi senyawa kompleks, seperti limbah tekstil, di lingkungan.

F. Teknik Imobilisasi Enzim Lakase

Pemanfaatan enzim secara bebas (*free enzyme*) menghadapi kendala dalam penyimpanan, kestabilan, operasional, serta rendahnya penggunaan berulang (*reusability*). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penulis telah menemukan teknik imobilisasi lakase sebagai inovasi kunci dalam aplikasi enzim di lapangan. Material imobilisasi yang direkomendasikan harus memiliki karakteristik murah, tidak toksik, dapat diperbarui (*renewable material*), dan mampu mempertahankan aktivitas enzim. Berbagai studi yang dilakukan oleh penulis telah menunjukkan keberhasilan imobilisasi pada berbagai material seperti pada alginat (Yanto et al., 2014; Yanto dan Tachibana, 2015**),** polivinil alginat (Yanto et al., 2017), serat kapuk (Yanto dan Tachibana, 2016), perlite (Bankeeree et al. 2022), *light expanded clay aggregate* (LECA) (Yanto et al., 2023), alginat selulosa (Oktaviani et al., 2024), arang aktif (Anita et al., 2025), dan *halloysite nanotube* (Naser et al. 2025).

Imobilisasi lakase dari *Trametes hirsuta* EDN 082 pada *light expanded clay aggregate* (LECA) mencapai efisiensi imobilisasi sebesar 79% dan mampu mendegradasi pewarna RBBR (99%) serta limbah cair batik yang mengandung pewarna indigosol (98%) dengan penggunaan berulang selama 4–6 siklus (Anita et al., 2020; Yanto et al., 2021). Dalam penelitian ini, lakase terbukti dapat diimobilisasi

pada LECA secara kovalen dengan bantuan (3–*aminopropyl*) *trimethoxysilane* (APTS) dan glutaraldehida dengan mekanisme imobilisasi seperti pada Gambar 3.3.



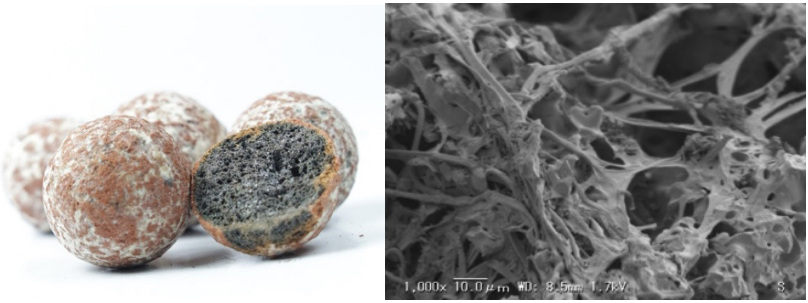
Gambar 3.3 Mekanisme imobilisasi lakase pada LECA yang dimodifikasi oleh APTS dan glutaraldehida

Imobilisasi lakase pada campuran alginat–nanoselulosa memiliki efisiensi imobilisasi mencapai 98% dan mampu mendegradasi pewarna *methylene blue* (79%) dan RBBR (89%) setelah 5 siklus penggunaan berulang (Oktaviani et al., 2023; Oktaviani et al., 2024). Imobilisasi lakase pada karbon aktif yang dimodifikasi memperoleh efisiensi imobilisasi sebesar 50% dengan dekolorisasi pewarna RB5 sebesar 88% setelah 4 jam. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lakase bebas yang hanya mampu mendekolorisasi RBBR sebesar 36% (Anita et al., 2025**).**

Lakase juga telah diimobilisasi pada material *halloysite nanotubes* (HNTs), yaitu material ramah lingkungan dengan karakteristik biokompatibel, tidak toksik, serta memiliki banyak pori. Karakteristik tersebut menjadikan HNT sebagai kandidat potensial untuk digunakan

dalam degradasi senyawa pewarna. Imobilisasi lakase pada HNT memanfaatkan asam amino dan glutaraldehida sebagai agen pengikat silang untuk memfasilitasi imobilisasi kovalen antara HNT dan lakase (Naser et al., 2025).

Imobilisasi JPK *T. hirsuta* pada materi *light expanded clay aggregate* (LECA) yang dikenal sebagai myco-LECA (paten terdaftar P00201910056) (Gambar 3.4) menunjukkan peningkatan aktivitas, kestabilan dan *reusability* yang tinggi dalam mendegradasi berbagai jenis pewarna dan limbah tekstil (Ardiati et al., 2019; Ardiati et al., 2024). LECA cocok sebagai *bio-carrier untuk* JPK *T. hirsuta* karena menyediakan tempat yang baik bagi pertumbuhan miselia JPK, yang dapat dilihat pada pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Produk myco-LECA (a), pengamatan miselia *T. hirsuta* EDN 082 pada myco-LECA menggunakan SEM (b)

Pengembangan imobilisasi *T. hirsuta* EDN 082 pada LECA menunjukkan penggunaan berulang yang tinggi, sehingga pada penggunaan hingga 20 kali ulangan masih menunjukkan dekolorisasi limbah pewarna tekstil yang tinggi (100%) dan aktivitas enzim lakase yang tetap terjaga. Hal ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi

pemanfaatan JPK dalam aplikasi di lingkungan tersebut (Yanto et al., 2023).

Temuan teknik imobilisasi enzim lakase dan JPK pada material seperti LECA, alginat–nanoselulosa, arang aktif, dan HNT telah mendorong diperolehnya produk bioremediasi yang lebih stabil, tahan penyimpanan, mudah dioperasikan, dan lebih efisien karena adanya siklus penggunaan berulang yang tinggi .

G. Pengungkapan Jalur Degradasi secara *In Vitro*

Reaksi katalitik lakase terhadap cemaran limbah pewarna tekstil diharapkan menghasilkan produk degradasi yang ramah lingkungan dan tidak beracun. Namun, jalur degradasi berbagai pewarna tekstil belum banyak diteliti. Penulis bersama tim merupakan yang pertama kali mengungkap jalur degradasi pewarna tekstil secara *in vitro* melalui pendekatan metabolomik.

Yanto et al. (2024) telah melakukan pemetaan jalur degradasi pewarna AB129 oleh lakase dari *T. hirsuta* EDN 082 menggunakan analisis *high-resolution liquid chromatography mass spectrometry* (HRLCMS). Pada penelitian ini, ditemukan bahwa proses degradasi AB129 (SM) terjadi melalui 2 jalur, yaitu 1-amino-4-hydroxy-9,10-dioxo-9,10-dihydroanthracene-2-sulfonic acid (D2) dan 2,4,6-trimethylaniline (D4). Hal ini mengindikasikan bahwa kedua senyawa ini menjadi pusat degradasi setelah pemecahan pewarna AB129. (Gambar 3.5).

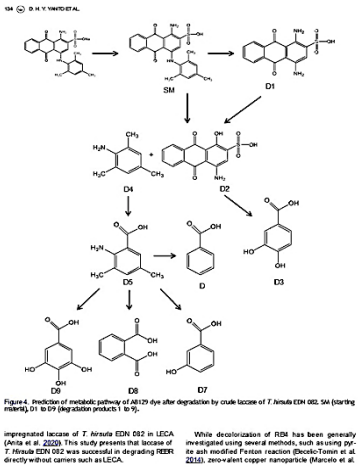


Figure 4. Prediction of metabolic pathway of AB129 dye after degradation by crude laccase of *T. hirsuta* EDN 082. SM (starting material), D1 to D9 (degradation products 1 to 9).

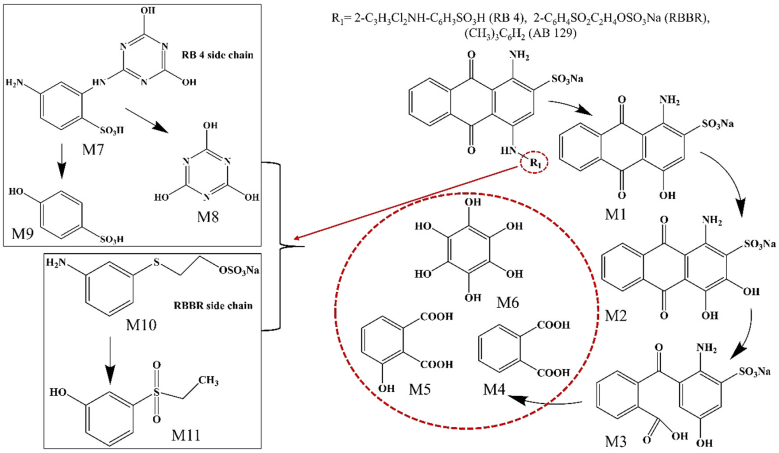
impregnated laccase of *T. hirsuta* EDN 082 in LECA (Anita et al. 2020). This study presents that laccase of *T. hirsuta* EDN 082 was successful in degrading RBBR directly without carriers such as LECA.

While decolorization of RB4 has been generally investigated using several methods, such as using pyrite ash modified Fenton reaction (Escolo-Tomin et al. 2014), zero-valent copper nanoparticle (Marcelo et al.

Sumber: Yanto et al., 2024

Gambar 3.5 Jalur degradasi pewarna AB129 menggunakan lakase dari *T. hirsuta* EDN 082

Hasil pemetaan jalur degradasi pewarna antrakuinon oleh lakase *T. hirsuta* EDN 082 ini sejalan dengan jalur metabolisme yang pernah ditemukan sebelumnya oleh penulis saat mendegradasi tiga pewarna antrakuinon (*Reactive Blue* 4 (RB4), *Remazol Brilliant Blue R* (RBBR), dan *Acid Blue* 129 (AB129)) menggunakan JPK *T. hirsuta* D7 yang juga merupakan penghasil lakase (Alam et al., 2021). Penelitian ini berhasil mengonfirmasi bahwa proses dekolorisasi oleh isolat JPK merupakan proses biodegradasi yang mengubah kompleksitas senyawa serta toksisitasnya. Analisis produk biodegradasi mengungkap senyawa-senyawa intermediet dan jalur degradasi dari ketiga jenis pewarna antrakuinon tersebut (Gambar 3.6).

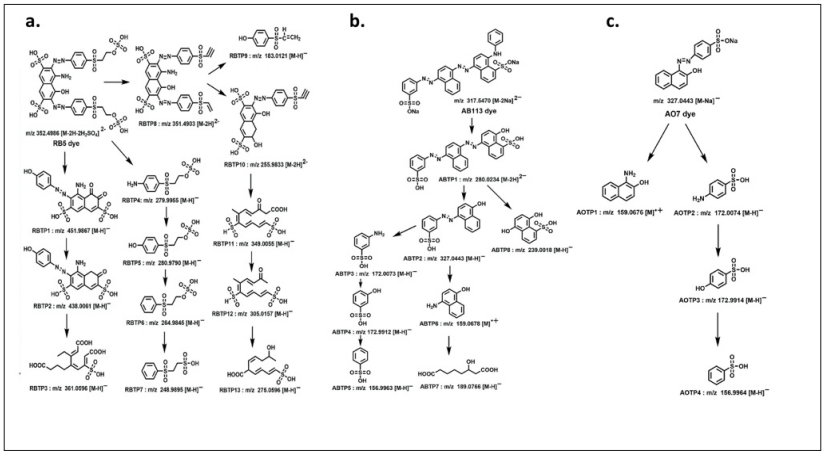


Sumber: Alam et al., 2021

Gambar 3.6. Jalur biodegradasi pewarna antrakuinon oleh *T. hirsuta* D7

Pemetaan jalur degradasi juga telah dilakukan terhadap tiga pewarna azo (*Reactive Black* 5 (RB), *Acid Blue* 113 (AB113), dan *Acid Orange* 7 (AO7)) menggunakan JPK *T. hirsuta* D7 (Alam et al., 2023). Analisis UPLC-PDA-FTICR-MS dapat mengungkap jalur metabolisme pewarna azo sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.7.

Selain jalur degradasi pewarna tekstil, penulis bersama tim juga telah mengidentifikasi jalur degradasi hidrokarbon poliaromatik. Hidayat dan Yanto (2018) mendeteksi metabolit hasil degradasi selama proses degradasi fenantrena dalam kultur cair.



Gambar 3.7 Jalur biodegradasi pewarna azo; (a) RB5, (b) AB113, (c) AO7

Penelitian terbaru telah mengungkap jalur degradasi fenantrena (Phe) yang dicampur dengan antrasena (ANT) dan benzo[a]pyrene (BaP), serta kombinasinya menggunakan isolat *Phellinus noxius* BRB 11 (yang juga penghasil lakase) sebagai agen biodegradasi (Zalkifal et al., 2025). Jalur degradasi fenantrena pada penelitian ini menghasilkan 9-phenanthrol dan 9,10-dihydro-9,10-dihydroxyphenanthrene sebagai produk utama.

H. Detoksifikasi Cemaran oleh Lakase

Selain jalur degradasi yang telah menunjukkan perombakan pewarna menjadi senyawa yang lebih sederhana, pengujian toksisitas juga menunjukkan bahwa senyawa hasil degradasi aman bagi manusia dan lingkungan. Pengujian toksisitas terhadap hasil degradasi senyawa antrakuinon menunjukkan tidak toksik terhadap sel dermis manusia (HDF) (Alam et al., 2021). Demikian pula, hasil degradasi pewarna

azo tidak bersifat toksik terhadap sel dermis manusia (HDF) dan sel keratinosit manusia (HaCaT) (Alam et al., 2023).

Pada penelitian sebelumnya juga telah dibuktikan bahwa hasil bioremediasi limbah tekstil dan batik menggunakan enzim lakase tidak bersifat toksik terhadap *Artemia salina* dan *Vigna radiata* (Yanto et al., 2021; Yanto et al., 2023).

Hingga saat ini, isolasi, skrining, bioprospeksi, dan aplikasi lakase, khususnya dari isolat *T. hirsuta* EDN 082 dan *T. hirsuta* D7, yang dilakukan penulis dan tim, dalam bioremediasi dan dekolorisasi limbah cair industri termasuk yang paling lengkap di Indonesia. Penggunaan kedua isolat ini sebagai agen bioremediasi telah terbukti melalui rangkaian penelitian panjang selama 10 tahun terakhir hingga diperoleh inovasi yang siap diaplikasikan secara langsung dalam pengolahan limbah. Selain itu, capaian keilmuan yang diraih melalui publikasi-publikasi terkait kedua isolat ini di bidang bioremediasi dapat menjadi tolok ukur pentingnya upaya bioprospeksi terhadap kekayaan biodiversitas Indonesia serta pemanfaatannya.

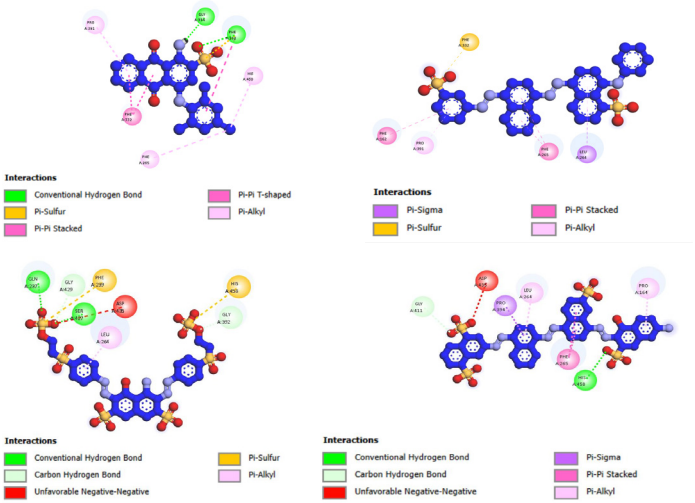
I. Pengungkapan Mekanisme Degradasi secara *in Silico*

Hasil studi *in silico* dapat menunjukkan struktur dan fungsi gen (Chopra et al., 2023). *Multiple sequence alignment* menggunakan server COBALT NCBI berhasil menyoroti wilayah yang terkonservasi dan tidak terkonservasi, empat domain pengikat tembaga, serta residu sistein yang terkonservasi. Domain pengikat tembaga pada lakase Thlacc1 diidentifikasi sebagai berikut: L1 pada residu 64–70 (HWHGFFQ), L2 pada residu 109–115 (HSHLSTQ), L3 pada residu 395–401 (HPFHLHG), dan L4 pada residu 452–459 (HCHIDFHL). Lima residu sistein yang terkonservasi diamati pada sekuens yang disajikan secara sejajar. Pada lakase Thlacc1, residu-residu tersebut terletak pada C85, C117, C205, C453, dan C488, yang mengindikasikan signifikansi struktural dan fungsionalnya. Secara

khusus, C453 terletak pada domain L4 dan berinteraksi langsung dengan atom tembaga. Posisi ini digunakan untuk memprediksi potensial redoks lakase dengan mengidentifikasi residu ke-10 setelah C453, dalam hal ini F462, sehingga mengategorikan Thlacc1 sebagai *High-Redox Potential Laccase* (HRPL) dengan potensial redoks lebih dari 710 mV sebagaimana terdapat pada Tabel 2.1. Empat residu sistein lainnya terkonservasi dan membentuk ikatan disulfida, yaitu C117 berpasangan dengan C205 dan C85 berikatan dengan C488. Ikatan disulfida ini terkonservasi pada seluruh sekuens yang disejajarkan, yang semakin menegaskan perannya dalam menjaga stabilitas dan fungsi protein.

Simulasi *docking* telah dilakukan terhadap 4 pewarna sintetis menggunakan Model 03 (model yang diperoleh setelah validasi struktur). Di antara pewarna yang diuji, DB71 menunjukkan afinitas pengikatan tertinggi (-8,440 kcal/mol), diikuti oleh AB129 (-7,886 kcal/mol), AB113 (-7,838 kcal/mol), dan RB5 (-5,825 kcal/mol) (Tabel 3.2). Interaksi spesifik serta residu yang terlibat dalam pengikatan masing-masing pewarna disajikan pada Gambar 3.8.

Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa afinitas pengikatan berkorelasi dengan aktivitas dekolorisasi hingga batas tertentu. DB71 dan RB5 menunjukkan dekolorisasi yang rendah (<2%) setelah 3 jam inkubasi, sementara AB129 dan AB113 menunjukkan efisiensi dekolorisasi masing-masing sebesar 24% dan 63% (Tabel 3.2). Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun afinitas pengikatan dapat memberikan pengaruh positif terhadap laju dekolorisasi, faktor lain seperti jenis interaksi molekuler serta residu asam amino spesifik yang terlibat pada situs aktif enzim juga berperan penting dalam menentukan efisiensi dekolorisasi pewarna yang diuji, sebagaimana telah dibahas dalam analisis sebelumnya.



Gambar 3.8 Interaksi 2D lakase Thlacc1 rekombinan dan pewarna sintetik (a) *Acid Blue* 129, (b) *Acid Blue* 113, (c) *Reactive Black* 5, dan (d) *Direct Blue* 71

Direct Blue 71 (DB71) menunjukkan nilai afinitas pengikatan tertinggi (−8,44 kcal/mol), yang mengindikasikan potensi aktivitas dekolorisasi. Namun, hasil dekolorisasi eksperimen menunjukkan hasil yang bertentangan karena DB71 hanya mengalami dekolorisasi sebesar 1,1% setelah 3 jam inkubasi. Sebaliknya, laju dekolorisasi pewarna lain yang diuji tampak berkorelasi positif dengan afinitasnya. Lakase Thlacc1 rekombinan tidak mampu mendekolorisasi RB5 secara efisien (<1%), sejalan dengan temuan sebelumnya yang dilaporkan oleh Yanto et al. (2024). Sementara itu, *Acid Blue* 113 (AB113) dan *Acid Blue* 129 (AB129) berhasil didekolorisasi oleh lakase Thlacc1 rekombinan, meskipun dengan tingkat efisiensi yang berbeda (masing-masing 63,2% dan 24,5%). Hasil ini menunjukkan

bahwa afinitas pengikatan bukan satu-satunya faktor yang berperan penting dalam menentukan efisiensi dekolorisasi pewarna.

Tabel 3.2 Residu asam amino yang terlibat serta afinitas pengikatannya

Pewarna Tekstil	Kontak Residu	*Afinitas pengikatan (kcal mol^{-1})*	Degradasi *in vitro* (%)
Acid Blue 129	**Phe162**, Phe265, Phe332, Gly334, Pro391, His458	-7.886	24
Acid Blue 113	**Phe162**, Leu264, Phe265, Phe332, Pro391	-7.838	63
Reactive Black 5	Gln237, Phe239, Leu264, Gly392, Ser427, Gly429, Asp435, His458	-5.825	1.1
Direct Blue 71	Pro164, Leu264, Phe265, Pro394, Gly411, Asp435, His458	-8.440	<1

Analisis interaksi molekuler mengungkapkan bahwa Phe162, Phe265, Gly392, dan His458 merupakan residu yang paling sering terlibat dalam interaksi, yang mengindikasikan kemungkinan perannya dalam proses oksidasi substrat. Khususnya, Phe162 membentuk interaksi dengan seluruh substrat yang menunjukkan hasil positif, yaitu AB113 dan AB129. Tidak adanya interaksi dengan Phe162 mungkin menjelaskan kegagalan dekolorisasi pada DB71 dan RB5,

meskipun keduanya masing-masing memiliki afinitas pengikatan tinggi. Analisis struktural lebih lanjut menunjukkan bahwa cincin aromatik Phe162 menonjol ke arah dalam akibat sifat nonpolarnya dan berada dalam jarak dekat dengan His458, yang mengoordinasikan tembaga katalitik T1. Posisi ini kemungkinan membantu mengarahkan dan menstabilkan substrat pada situs katalitik. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi antara afinitas pengikatan dan interaksi yang tepat dengan residu kunci pada situs aktif, seperti Phe162, menentukan efektivitas dekolorisasi pewarna oleh lakase Thlacc1.

J. Diseminasi dan Aplikasi

Produk myco-LECA (Gambar 3.4) telah didiseminasikan dalam beberapa kegiatan, seperti pada 15 Oktober 2021 di Kota Pekalongan. Pada kegiatan tersebut, produk myco-LECA diperkenalkan melalui presentasi workshop dan diaplikasikan pada penampungan air limbah salah satu pengrajin batik di Kota Pekalongan, dengan aliran limbah kontinu sebesar 3–5 m^3 per hari. Hasil pengamatan selama 2–3 pekan telah menunjukkan kinerja myco-LECA dalam menjernihkan air limbah tersebut.

Produk myco-LECA juga telah diperkenalkan kepada beberapa perusahaan pengolahan limbah di Jakarta, Jawa Barat, dan Jawa Tengah untuk menunjukkan kemampuan myco-LECA dalam mengolah limbah cair perusahaan tersebut. Hasil penelitian telah menunjukkan kemampuan myco-LECA dalam mendegradasi dan mendetoksifikasi air limbah tersebut (Ardiati et al. 2019; Yanto et al. 2023, dan Ardiati et al. 2024**).**

Produk enzim lakase juga telah didiseminasikan pada salah satu perusahaan yang memproduksi produk *personal care* khususnya pasta gigi dan cairan kumur, dan telah diuji coba untuk pengembangan

produk pasta gigi dan cairan kumur baru berbasis enzim lakase (Gambar 3.9). Kegiatan kolaborasi riset ini didukung oleh perjanjian kerja sama dan telah menghasilkan publikasi serta paten bersama. Produk pasta gigi enzim dan cairan kumur menunjukkan aktivitas antimikroba terhadap patogen, menjaga warna gigi tetap putih serta mendukung pertumbuhan flora mikro yang baik bagi mulut (Karimah et al., *in press*). Selain itu, enzim lakase dan produk pasta gigi lakase ini telah didiseminasikan melalui berbagai kegiatan pameran produk hasil penelitian.



Gambar 3.9 Prototipe produk pasta gigi dan cairan kumur berbasis enzim lakase

Rangkaian temuan tersebut menunjukkan bahwa teknologi lakase telah bergerak dari tahap pembuktian ilmiah menuju tahap kesiapan untuk diterapkan. Namun, keberhasilan ilmiah belum tentu secara otomatis menjamin keberhasilan hilirisasi. Diperlukan jembatan antara kinerja enzim di laboratorium, stabilitas sistem pada limbah riil, kelayakan ekonomi produksi, standar keamanan, serta kesiapan industri sebagai pengguna teknologi. Oleh karena itu, pembahasan berikut diarahkan pada peluang dan tantangan hilirisasi enzim lakase di Indonesia.

BAB IV. PELUANG DAN TANTANGAN HILIRISASI ENZIM LAKASE DI INDONESIA

Temuan lakase baru Thlacc1 dan rangkaian inovasi yang menyertainya telah membuka peluang untuk pengembangan teknologi bioremediasi yang tidak hanya kompetitif secara ilmiah, tetapi juga aplikatif secara industri. Lebih jauh, peluang hilirisasi dan pemanfaatan enzim lakase di Indonesia tidak hanya terbatas pada aspek bioremediasi lingkungan, tetapi juga merambah berbagai sektor strategis lain yang bernilai ekonomi tinggi. Dalam industri tekstil, lakase berpotensi menggantikan bahan kimia berbahaya dalam proses dekolorisasi dan pemrosesan kain secara lebih ramah lingkungan. Pada industri pulp dan kertas, lakase dapat digunakan dalam proses *biodeinking* dan *biobleaching* untuk mengurangi penggunaan klorin yang berbahaya. Di sektor pangan, lakase berperan dalam meningkatkan kualitas produk melalui modifikasi senyawa fenolik, sementara di bidang energi, lakase berpotensi untuk pengembangan biofuel dan bioelektrokimia. Bahkan, perkembangan mutakhir menunjukkan bahwa lakase juga berpeluang diaplikasikan dalam biosensor (Al-Momani et al., 2026), kosmetik dan *personal care* (Andriani dan Yanto, 2024; Karimah et al., *in press*), nanoteknologi, bioterapi kanker, serta sintesis senyawa bernilai tinggi untuk industri farmasi dan kesehatan (Shahedi et al., 2022).

Namun demikian, di balik peluang besar tersebut, terdapat sejumlah tantangan mendasar yang perlu diatasi secara komprehensif. Tantangan pertama adalah masih terbatasnya kapasitas riset lanjutan yang menghubungkan temuan dasar (*discovery*) dengan tahap hilirisasi dan komersialisasi. Banyak inovasi enzim berhenti pada skala laboratorium dan belum mampu menembus skala industri. Hal ini berkaitan erat dengan keterbatasan infrastruktur *pilot plant*, fasilitas

scale-up, serta ekosistem inovasi yang belum sepenuhnya terintegrasi antara lembaga riset, perguruan tinggi, dan industri.

Tantangan kedua adalah aspek ekonomi dan daya saing. Produksi enzim dalam skala industri membutuhkan biaya yang kompetitif agar mampu bersaing dengan produk impor atau alternatif kimia yang sudah mapan. Proses fermentasi, pemurnian, stabilisasi, serta formulasi enzim memerlukan optimasi teknologi yang berkelanjutan. Tanpa dukungan investasi dan insentif kebijakan, inovasi enzim lokal berpotensi kalah dalam kompetisi pasar global.

Tantangan ketiga berkaitan dengan regulasi dan standardisasi. Penggunaan enzim dalam berbagai sektor industri, khususnya pangan, kesehatan, dan lingkungan, memerlukan regulasi yang ketat dan berbasis bukti ilmiah. Proses perizinan yang panjang dan belum seragam sering kali menjadi hambatan dalam mempercepat adopsi teknologi berbasis enzim. Selain itu, masih diperlukan penguatan standar mutu dan sertifikasi untuk memastikan kualitas dan keamanan produk enzim yang dihasilkan di dalam negeri. Dalam kaitannya dengan perizinan, penulis telah berhasil memperoleh rekomendasi dari BPOM RI terkait pemanfaatan enzim lakase untuk kosmetik dan farmasi.

Tantangan keempat adalah keterbatasan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi multidisiplin. Pengembangan enzim lakase tidak hanya membutuhkan keahlian mikrobiologi, tetapi juga biokimia, rekayasa genetika, teknik bioproses, hingga ekonomi industri. Kolaborasi lintas disiplin yang belum optimal menjadi salah satu kendala dalam mempercepat inovasi dari hulu ke hilir.

BAB V. ARAH STRATEGIS INOVASI ENZIM LAKASE DALAM MENDUKUNG HILIRISASI DAN KEMANDIRIAN ENZIM NASIONAL

Rangkaian riset yang telah dipaparkan pada bab sebelumnya menunjukkan bahwa Indonesia memiliki modal ilmiah yang kuat untuk pengembangan enzim lakase berbasis biodiversitas nasional. Melalui bioprospeksi jamur pelapuk kayu asli Indonesia, pengungkapan potensi enzim lakase, penemuan gen lakase baru Thlacc1, pengembangan sistem lakase-mediator, teknik imobilisasi, serta validasi jalur degradasi dan detoksifikasi, inovasi lakase telah mencapai tahap yang tidak lagi hanya bersifat eksploratif, tetapi memiliki dasar ilmiah yang kuat untuk diarahkan menuju hilirisasi. Oleh karena itu, tantangan strategis ke depan bukan semata-mata menemukan enzim baru, melainkan bagaimana mengubah capaian riset tersebut menjadi teknologi, produk, dan sistem bioremediasi yang dapat diterapkan secara luas, ekonomis, aman, dan berkelanjutan.

Dalam konteks pembangunan nasional, inovasi enzim lakase memiliki relevansi tinggi dengan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya dalam penyediaan air bersih dan sanitasi, konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab, penanganan perubahan iklim, serta perlindungan ekosistem daratan. Pemanfaatan lakase dalam bioremediasi dan industri hijau juga sejalan dengan konsep *Bio-Circular-Green* (BCG) *Economy* karena menghubungkan pemanfaatan sumber daya hayati, prinsip ekonomi sirkular, dan teknologi ramah lingkungan. Lebih jauh lagi, pengembangan enzim lakase berbasis biodiversitas nasional merupakan bentuk kontribusi nyata terhadap visi Asta Cita Presiden Republik Indonesia, terutama dalam penguatan ketahanan air, pangan, energi, ekonomi hijau, serta pengembangan sains dan teknologi. Inovasi ini juga sejalan dengan *Indonesia Biodiversity Strategy and Action Plan* (IBSAP) 2025–2045 yang menekankan pentingnya

pemanfaatan keanekaragaman hayati secara berkelanjutan melalui bioprospeksi dan bioteknologi yang bertanggung jawab.

Untuk memastikan inovasi lakase tidak berhenti pada capaian akademik, diperlukan peta jalan pengembangan yang terarah. Peta jalan ini perlu disusun dalam tiga horizon utama, yaitu jangka pendek, jangka menengah, dan jangka panjang. Ketiga horizon tersebut merupakan tahapan berkelanjutan dalam penguatan kesiapan teknologi (TKT), pembentukan ekosistem hilirisasi, hingga pembangunan kemandirian enzim nasional.

Dalam jangka pendek, yaitu periode 2026–2030, arah strategis utama adalah meningkatkan TKT dari skala laboratorium ke skala pilot dan demonstrasi skala terbatas. Pada tahap ini, inovasi lakase yang telah terbukti efektif dalam degradasi dan detoksifikasi berbagai cemaran perlu diuji dalam kondisi nyata yang lebih kompleks, seperti pada instalasi pengolahan air limbah industri tekstil, batik, petrokimia, farmasi, serta sektor lain yang menghasilkan cemaran organik persisten. Uji skala pilot menjadi tahap penting untuk memastikan stabilitas kinerja enzim, efisiensi proses, umur pakai sistem imobilisasi, kebutuhan operasional, serta kemampuan teknologi ini untuk beradaptasi terhadap variasi karakteristik limbah industri. Pada tahap ini pula perlu dilakukan penyusunan parameter mutu awal, protokol aplikasi, analisis biaya proses, serta model kerja sama dengan industri pengguna.

Pada periode jangka pendek ini, pengembangan produk lakase perlu diarahkan pada bentuk yang paling realistis untuk diterapkan di lapangan. Produk tidak harus selalu berupa enzim murni, tetapi dapat dikembangkan dalam bentuk enzim kasar, konsentrat enzim, enzim terimobilisasi, *bio-carrier* berbasis jamur pelapuk kayu, atau sistem bioreaktor berbasis myco-LECA. Pendekatan ini penting agar teknologi lakase memiliki nilai praktis, mudah digunakan, ekonomis, dan sesuai dengan kebutuhan industri pengolahan limbah. Dengan

demikian, jangka pendek merupakan fase validasi lapangan dan pembuktian keekonomian teknologi.

Dalam jangka menengah, yaitu periode 2030–2035, arah strategis perlu difokuskan pada perluasan hilirisasi, standardisasi, penguatan regulasi, dan adopsi industri. Pada tahap ini, teknologi lakase yang telah tervalidasi pada skala pilot perlu dikembangkan hingga skala demonstrasi yang lebih luas dan mulai diintegrasikan ke dalam sistem pengolahan limbah industri. Pengembangan proses produksi enzim skala besar, formulasi produk, standardisasi mutu, sertifikasi keamanan, serta penyusunan baku teknis aplikasi menjadi agenda penting. Validasi detoksifikasi harus menjadi komponen utama dalam standardisasi, karena bioremediasi tidak boleh hanya menghilangkan warna atau menurunkan konsentrasi cemaran, tetapi juga harus memastikan bahwa produk akhir yang dihasilkan tidak bersifat toksik bagi lingkungan dan kesehatan.

Pada tahap jangka menengah, kemitraan antara lembaga riset, perguruan tinggi, industri, pemerintah daerah, dan regulator perlu diperkuat. Lembaga riset berperan dalam pengembangan teknologi dan validasi ilmiah; perguruan tinggi dalam penguatan sumber daya manusia dan riset lanjutan; industri dalam uji coba lapangan dan adopsi teknologi; pemerintah daerah dalam fasilitasi penerapan di sentra industri; serta regulator dalam memastikan standar keamanan dan kepatuhan. Sentra batik, tekstil, petrokimia, pulp dan kertas, serta industri *personal care* dapat menjadi lokasi strategis untuk penerapan awal teknologi lakase berbasis biodiversitas Indonesia. Pada fase ini juga perlu dibangun model bisnis, lisensi teknologi, dan skema insentif agar industri terdorong untuk mengadopsi teknologi hijau berbasis enzim.

Dalam jangka panjang, yaitu periode 2035–2045, arah strategis pengembangan lakase perlu ditempatkan dalam kerangka besar kemandirian enzim nasional. Indonesia selama ini masih banyak

bergantung pada produk enzim impor untuk berbagai kebutuhan industri. Ketergantungan ini menjadi tantangan sekaligus peluang untuk membangun industri enzim berbasis sumber daya hayati lokal. Inovasi lakase dapat menjadi salah satu pintu masuk strategis untuk memperkuat kemandirian tersebut. Upaya ini perlu didukung oleh bank isolat mikroba unggul, basis data enzim nasional, fasilitas produksi skala industri, pusat formulasi dan standardisasi enzim, jejaring industri pengguna, serta perlindungan kekayaan intelektual yang kuat.

Pada horizon jangka panjang, pengembangan lakase tidak hanya diarahkan untuk menyelesaikan masalah pencemaran lingkungan, tetapi juga menjadi bagian dari pembangunan bioindustri nasional. Enzim lakase dapat diperluas pemanfaatannya pada sektor tekstil, pulp dan kertas, pangan, energi, biosensor, kosmetik, *personal care*, farmasi, dan kesehatan, sesuai dengan standar keamanan dan regulasi masing-masing sektor. Dengan dukungan kebijakan yang tepat, enzim lakase berpeluang menjadi salah satu produk bioteknologi unggulan nasional yang mendukung ekonomi hijau, substitusi impor, penciptaan nilai tambah dari sumber daya hayati, dan peningkatan daya saing Indonesia di tingkat global.

Keberhasilan peta jalan tersebut memerlukan penguatan ekosistem kebijakan dan regulasi yang adaptif. Pemerintah perlu mendorong percepatan standardisasi produk bioteknologi, penyederhanaan proses perizinan berbasis bukti ilmiah, penguatan perlindungan hak kekayaan intelektual, serta pemberian insentif bagi industri yang mengadopsi teknologi hijau. Regulasi yang jelas dan berpihak pada inovasi akan mempercepat translasi hasil riset menjadi produk, proses, dan layanan teknologi yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat dan industri.

Di samping itu, pengembangan kapasitas sumber daya manusia menjadi faktor penentu keberlanjutan inovasi enzim lakase. Hilirisasi enzim memerlukan peneliti, teknologi, analis mutu, ahli bioproses, ahli

lingkungan, ahli regulasi, serta pelaku industri yang mampu bekerja secara terpadu. Oleh karena itu, program pelatihan teknis, magang industri, mobilitas peneliti, kolaborasi internasional, serta pendidikan berbasis riset dan inovasi perlu terus diperkuat untuk menghasilkan generasi peneliti dan inovator yang mampu menjawab tantangan bioteknologi global.

Dengan arah strategis tersebut, inovasi enzim lakase berbasis biodiversitas Indonesia dapat ditempatkan sebagai teknologi kunci yang menghubungkan keunggulan sumber daya hayati nasional dengan kebutuhan industri hijau dan pembangunan berkelanjutan. Lakase tidak hanya menjadi solusi bioremediasi untuk mengatasi pencemaran lingkungan, tetapi juga menjadi model pengembangan bioindustri nasional berbasis riset, inovasi, kekayaan intelektual, dan sumber daya lokal. Melalui sinergi antara riset yang kuat, hilirisasi yang terarah, regulasi yang adaptif, dan dukungan industri, Indonesia memiliki peluang besar untuk membangun kemandirian enzim nasional sekaligus berkontribusi dalam menjawab krisis global, terutama pencemaran lingkungan, perubahan iklim, dan hilangnya biodiversitas.

BAB VI. KESIMPULAN

Krisis global *triple planetary crisis* yang meliputi pencemaran lingkungan, perubahan iklim, dan hilangnya biodiversitas menuntut hadirnya solusi inovatif yang efektif, aman, berkelanjutan, dan berbasis pada kekuatan sumber daya lokal. Dalam konteks tersebut, rangkaian riset dan inovasi enzim lakase berbasis jamur pelapuk kayu (JPK) asli Indonesia yang dipaparkan dalam orasi ini membuktikan bahwa biodiversitas nasional merupakan sumber solusi strategis untuk menjawab permasalahan lingkungan, khususnya pencemaran akibat limbah tekstil, batik, petrokimia, serta cemaran organik persisten lainnya.

Melalui pendekatan bioprospeksi yang sistematis, penelitian ini berhasil mengungkap potensi JPK lokal sebagai sumber enzim lakase yang unggul. Capaian penting dari rangkaian penelitian tersebut adalah ditemukannya enzim lakase baru, Thlacc1, dari *Trametes hirsuta* EDN 082, yang memiliki karakteristik lakase dengan nilai potensial redoks tinggi dan berpotensi mengoksidasi berbagai senyawa pencemar yang kompleks. Temuan ini tidak hanya memperkaya khazanah ilmu pengetahuan mengenai enzim lakase dari biodiversitas Indonesia, tetapi juga menegaskan pentingnya pemanfaatan sumber daya hayati dan genetik nasional secara bertanggung jawab melalui pendekatan bioprospeksi dan bioteknologi.

Dari aspek inovasi teknologi, pengembangan sistem lakase-mediator terbukti mampu memperluas kemampuan lakase dalam mendegradasi senyawa yang sulit dirombak secara alami. Selain itu, teknik imobilisasi JPK dan enzim lakase pada berbagai material, seperti *light expanded clay aggregate* (LECA), alginat-nanoselulosa, karbon aktif, dan *halloysite nanotube* (HNT), berhasil meningkatkan stabilitas, efisiensi operasional, serta kemampuan penggunaan

berulang. Inovasi ini menjadikan teknologi berbasis lakase semakin aplikatif, efisien, dan berpotensi diterapkan dalam sistem pengolahan limbah yang lebih berkelanjutan.

Penelitian ini juga memberikan kontribusi penting dalam pengungkapan jalur degradasi dan mekanisme detoksifikasi berbagai senyawa pencemar, baik melalui pendekatan *in vitro* berbasis metabolomik maupun *in silico* berbasis pemodelan molekuler. Dengan demikian, proses bioremediasi yang dikembangkan tidak hanya berorientasi pada penghilangan warna atau penurunan konsentrasi cemaran, tetapi juga pada pembuktian bahwa produk degradasi yang dihasilkan lebih aman bagi lingkungan dan kesehatan. Aspek detoksifikasi ini menjadi nilai pembeda utama dalam pengembangan teknologi bioremediasi berbasis lakase.

Secara keseluruhan, rangkaian temuan menunjukkan bahwa inovasi enzim lakase berbasis biodiversitas Indonesia merupakan kontribusi ilmiah yang utuh, mulai dari *discovery*, inovasi, validasi mekanistik, hingga aplikasi. Untuk itu, diperlukan proses pemanfaatan lakase secara lebih masif untuk berbagai aplikasi, baik bioremediasi, pangan, tekstil, pulp dan kertas, produk *personal care*, biosensor, maupun bidang kesehatan, melalui kerja sama dengan industri pengguna. Dengan demikian, inovasi lakase dapat memiliki relevansi strategis dalam mendukung pencapaian SDGs, *Bio-Circular-Green* (BCG) *Economy*, Asta Cita Presiden RI, serta agenda pemanfaatan biodiversitas secara berkelanjutan sebagaimana diamanatkan dalam IBSAP 2025–2045. Lakase tidak hanya menjadi solusi bioteknologi untuk bioremediasi, tetapi juga menjadi salah satu fondasi menuju bioindustri hijau dan kemandirian enzim nasional.

BAB VII. PENUTUP

Orasi ini menegaskan bahwa kekayaan biodiversitas Indonesia bukan hanya warisan alam yang harus dijaga, tetapi juga sumber inovasi strategis untuk menjawab tantangan pembangunan berkelanjutan. Jamur pelapuk kayu asli Indonesia dan enzim lakase yang dihasilkannya telah terbukti memiliki potensi besar sebagai agen bioremediasi yang efektif, ramah lingkungan, dan relevan dengan kebutuhan industri hijau di masa depan. Rangkaian riset yang telah dilakukan menunjukkan bahwa sumber daya hayati lokal, apabila dikembangkan melalui riset yang terarah dan berkelanjutan, dapat menghasilkan teknologi yang bernilai ilmiah, ekologis, dan ekonomi.

Namun demikian, capaian ilmiah ini bukanlah titik akhir. Tantangan utama ke depan adalah memastikan inovasi lakase tidak berhenti pada publikasi, paten, atau prototipe, tetapi dapat berkembang menjadi penerapan nyata di lapangan. Oleh karena itu, agenda strategis selanjutnya adalah memperkuat hilirisasi melalui peningkatan kesiapan teknologi, uji coba skala pilot dan demonstrasi, standardisasi mutu dan keamanan, pengembangan model bisnis, serta adopsi oleh industri pengguna. Dalam konteks ini, teknologi lakase perlu ditempatkan sebagai bagian dari solusi pengolahan limbah industri yang tidak hanya efektif, tetapi juga memenuhi prinsip keberlanjutan dan keamanan lingkungan.

Lebih jauh lagi, pengembangan lakase berbasis biodiversitas Indonesia dapat menjadi pintu masuk menuju kemandirian enzim nasional. Ketergantungan terhadap enzim impor perlu secara bertahap dikurangi melalui pembangunan ekosistem produksi enzim dalam negeri, penguatan bank isolat mikroba unggul, pengembangan fasilitas *pilot plant* dan formulasi enzim, perlindungan kekayaan intelektual, serta perluasan jejaring industri pengguna. Dengan langkah tersebut,

inovasi lakase dapat berkontribusi tidak hanya dalam penyelesaian masalah pencemaran lingkungan, tetapi juga dalam pembangunan bioindustri nasional yang berdaya saing.

Keberhasilan agenda besar ini membutuhkan sinergi lintas pihak. Pemerintah perlu menyediakan regulasi yang adaptif, insentif bagi teknologi hijau, serta dukungan terhadap produk inovasi dalam negeri. Lembaga riset dan perguruan tinggi berperan dalam memperkuat basis ilmiah, mengembangkan teknologi, serta menyiapkan sumber daya manusia. Industri menjadi mitra kunci dalam uji lapangan, produksi, dan adopsi teknologi. Masyarakat dan pemerintah daerah juga memiliki peran penting, terutama dalam penerapan teknologi di sentra-sentra industri yang menghasilkan limbah organik yang kompleks, seperti industri batik, tekstil, petrokimia, serta sektor terkait lainnya.

Sebagai penutup, inovasi enzim lakase berbasis biodiversitas Indonesia merupakan wujud nyata bahwa riset dapat memberikan jawaban atas persoalan lingkungan, sekaligus membuka jalan bagi kemandirian teknologi nasional. Dengan penguatan riset, hilirisasi yang terarah, kolaborasi lintas sektor, dan keberpihakan pada teknologi hijau, Indonesia memiliki peluang besar untuk menjadi pusat pengembangan enzim berbasis biodiversitas tropis. Melalui langkah tersebut, biodiversitas Indonesia dapat ditransformasikan menjadi aset strategis untuk solusi lingkungan, kemandirian teknologi serta fondasi bioindustri yang berkelanjutan bagi generasi masa kini dan masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan puji syukur yang tidak terhingga ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyampaikan orasi pengukuhan profesor riset pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Republik Indonesia ini dan acara orasi ini dapat berjalan dengan lancar. Acara orasi ini juga dapat terselenggara berkat kontribusi besar dari banyak pihak.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Yang Terhormat, Presiden Republik Indonesia, Bapak Prabowo Subianto dan Presiden Republik Indonesia ke-7 Bapak Ir. Joko Widodo atas amanat dan penugasan saya sebagai peneliti ahli utama di BRIN.

Ucapan terima kasih kepada Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Prof. Dr. Arif Satria, S.P., M.Si., dan Kepala BRIN periode 2021–2025, Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc., atas arahan dan kepercayaan yang diberikan dalam mendukung pengembangan karier dan kepakaran saya sebagai peneliti.

Ucapan terima kasih saya lanjutkan kepada Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, M.Sc., DESD., ASEAN Eng., atas dukungan beliau dalam menciptakan ekosistem riset yang kondusif bagi para periset untuk berkarya dan berkembang secara profesional.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D.; Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN, Prof., Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc.; Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah: Prof. Dr. Ekowati Chasanah, Prof. Dr. Subyakto, Prof. Dr. Bambang Prasetya, Prof. Dr. Ir. Yusuf Wibisono, STP., M.Sc., IPM., ASEAN.Eng.; Sekretaris Utama BRIN, Ibu Nur Tri Aries Suestiningtyas, M.A.; Kepala Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan

(ORHL), Dr. Andes Hamuraby Rozak, M.Sc.; Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia, Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si.; serta Panitia Pelaksana Pengukuhan; dan pihak-pihak lain yang berkenaan sehingga naskah orasi ini layak disampaikan pada sidang terbuka pengukuhan ini.

Perjalanan karier saya tidak terlepas dari dukungan yang diberikan oleh Dr. Ahmad Fathoni, M.Eng. (Kepala Pusat Riset Mikrobiologi Terapan (PRMT), ORHL, BRIN), serta Kepala Pusat Penelitian Biomaterial–LIPI terdahulu, atas dukungan dan kesempatan yang diberikan.

Penghormatan dan penghargaan yang setinggi-tingginya saya sampaikan kepada para guru saya di SD, SMP, dan SMA, serta dosen pembimbing S1 saya, Prof. Dr. Eti Rohaeti dan Dr. Betty Soebrata, atas segala ilmu yang telah diberikan selama saya menempuh studi di Departemen Kimia IPB University. Penghormatan dan penghargaan setinggi-tingginya kepada Prof. Dr. Sanro Tachibana dan Prof. Dr. Kazutaka Itoh sebagai *supervisor* dan *co-supervisor* saya yang telah membimbing saya dalam melakukan riset selama studi S2 dan S3 di Ehime University, Jepang. Ucapan terbaik juga saya sampaikan kepada para kolega dan mitra dari dalam dan luar negeri, khususnya kepada Prof. Takashi Watanabe dari RISH Kyoto University, Jepang, dan Prof. Sunghwan Kim dari Kyungpook National University, Republic of Korea, yang telah bekerja sama selama lebih dari 10 tahun dan telah menghasilkan karya bersama selama program *Japan-ASEAN Science Technology and Innovation Platform Network* 2015–2025 bahkan hingga saat ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh sivitas PRMT, BRIN, dan kelompok riset Enzim Lingkungan dan Bioremediasi Berkelanjutan di PRMT, BRIN atas dukungannya. Saya juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh *postdoctoral fellow* saya, mahasiswa S1, S2, dan S3 saya, serta asisten riset atas dukungan dan kerja sama mereka.

Penghormatan tertinggi dan tidak terhingga saya ucapkan kepada kedua orang tua saya, Bapak saya tercinta, Achmad Muhasar, dan Ibu saya, Sundari, atas segala kasih sayang, pengorbanan, dan bimbingan yang telah diberikan dalam mendidik, membimbing, dan membesarkan saya hingga saat ini. Semoga limpahan rahmat dan karunia Allah SWT selalu tercurah kepada kedua orang tua saya, dan segala pengorbanan yang begitu tulus dan ikhlas selama ini akan mendapatkan pahala berlipat ganda dari Allah SWT. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan sebesar-besarnya kepada istri tercinta, Nurul Aqidah, S.Si., yang selalu mendampingi dan mendukung saya sepenuh hati tanpa kenal lelah, dengan penuh cinta, kesabaran, pengertian, pengorbanan, serta keikhlasan. Terima kasih juga untuk anak-anak saya yang sholih dan sholihah, Nursyifa Naftakalia, Muhammad Alqowy Alfatih, Muhammad Sayyid Arroyah, dan Muhammad Syaddad Alliwa atas dukungan dan kasih sayangnya dengan sepenuh hati dan pengertian. Terima kasih juga saya ucapkan kepada Kakak saya, Mba Yuli Rohayani, dan Adik-adik saya, May Lidia Sari dan Alif Setiawan atas dukungan, motivasi dan semangatnya yang tidak pernah putus.

Terakhir, terima kasih saya sampaikan kepada panitia penyelenggara Orasi Pengukuhan Profesor Riset dan seluruh undangan sehingga acara ini dapat terselenggara dengan baik, lancar, dan penuh hikmat. Dengan mengucapkan alhamdulillah, saya akhiri orasi ilmiah ini. Terima kasih atas perhatian hadirin semua. Mohon maaf atas kekurangan dan kekhilafan dalam penyampaian orasi ilmiah ini.

Wa billahittaufiq wal hidaayah,

Wassalamualaykum wa rahmatullahi wa barakaatuh.

DAFTAR PUSTAKA

Abadulla, E., Tzanov, T., Costa, S., Robra, K. H., Cavaco-Paulo, A., & Gübitz, G. M. (2000). Decolorization and detoxification of textile dyes with a laccase from *Trametes hirsuta*. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(8), 3357–3362. https://doi.org/10.1128/AEM.66.8.3357-3362.2000.

Al-Momani, A. N., Iqbal, A., **Yanto, D. H. Y.,** Karimah, S. N., Khairuddean, M., Jazzazi, T. M. A., Ching, P. S., Haisen, L., Abdullah, M., Putra, A. B. N., Palupi, K. D., & Thimizir, M. Z. A. (2026). Microwave-assisted synthesis of laccase of *Trametes hirsuta*–derived carbon dots for ciprofloxacin detection. *Chemistry Africa*, 9(1), 34. https://doi.org/10.1007/s42250-025-01572-x.

Alam, R., Ardiati, F. C., Solihat, N. N., Alam, Md. B., Lee, S. H., **Yanto, D. H. Y.,** Watanabe, T., & Kim, S. (2021). Biodegradation and metabolic pathway of anthraquinone dyes by *Trametes hirsuta* D7 immobilized in light expanded clay aggregate and cytotoxicity assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124176. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124176.

Alam, R., Mahmood, R. A., Islam, S., Ardiati, F. C., Solihat, N. N., Alam, M. B., Lee, S. H., **Yanto, D. H. Y.,** & Kim, S. (2023). Understanding the biodegradation pathways of azo dyes by immobilized white-rot fungus, *Trametes hirsuta* D7, using UPLC-PDA-FTICR MS supported by in silico simulations and toxicity assessment. *Chemosphere*, 313, 137505. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137505.

Alam, R., Naznin, M., Ardiati, F. C., Solihat, N. N., Anita, S. H., Purnomo, D., **Yanto, D. H. Y.,** & Kim, S. (2024). Targeted and non-targeted identification of dye and chemical contaminants in Loji River, Indonesia using FT-ICR-MS. *Chemosphere*, 365, 143324. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143324.

Alam, R., Mahmood, R. A., **Yanto, D. H. Y.,** Kim, M. S., & Kim, S. (2025). Direct detection of textile dyes in environmental samples by LDI and MALDI FT-ICR MS. *Analytical Chemistry*, 97(31), 16723–16732. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5c00052.

Alberti, B. N., & Klibanov, A. M. (1981). Enzymatic removal of dissolved aromatics from industrial aqueous effluents. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*, 11, 373–379.

Andriani, A., Maharani, A., **Yanto, D. H. Y.,** Pratiwi, H., Astuti, D., Nuryana, I., Agustriana, E., Anita, S. H., Juanssilfero, A. B., Perwitasari, U., Pantouw, C. F., Nurhasanah, A. N., Windiastri, V. E., Nugroho, S., Widyajayantie, D., Sutiawan, J., Sulistyowati, Y., Rahmani, N., Ningrum, R. A., & Yopi. (2020). Sequential production of ligninolytic, xylanolytic, and cellulolytic enzymes by *Trametes hirsuta* AA-017 under different biomass of Indonesian sorghum accessions-induced cultures. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100562. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100562.

Andriani, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2024). Fungal Application in Skincare Products. In: Arung, E. T., *et al*. Biomass-based Cometics. Springer, Singapore, 113–132. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1908-2_5.

Andriani, D., Andriyani, R., Prabandani, A., Yuniati, M. D., **Yanto, D. H. Y.,** Zaidi, N. S., & Puteh, M. H. (2025). Characterization and treatment methods of hazardous compounds in batik wastewater: a review. *International Journal of Environmental Research*, 19(3), 83. https://doi.org/10.1007/s42250-025-01572-x.

Anita, S. H., Annisa, T., Oktaviani, M., Sari, F. P., Laksana, R. P. B., & **Yanto, D. H. Y.** (2018). Biodekolorisasi pewarna tekstil antrakuinon menggunakan isolat jamur tropis Indonesia. *Prosiding Seminar Lignoselulosa 2018*, 148–154. Cibinong, 19 September 2018.

Anita, S. H., Ardiati, F. C., Oktaviani, M., Sari, F. P., Nurhayat, O. D., Ramadhan, K. P., & **Yanto, D. H. Y.** (2020). Immobilization of laccase from *Trametes hirsuta* EDN 082 in light expanded

clay aggregate for decolorization of Remazol Brilliant Blue R dye. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100602. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100602.

Anita, S. H., Ardiati, F. C., Ramadhan, K. P., Laksana, R. P. B., Sari, F. P., Nurhayat, O. D., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Decolorization of synthetic dyes by tropical fungi isolated from Taman Eden 100, Toba Samosir, North Sumatra, Indonesia. *Hayati Journal of Biosciences*, 29(4), 417–427. https://doi.org/10.4308/hjb.29.4.417-427.

Anita, S. H., Asishe, A., Syafriana, V., Febriani, A., Zulfiana, D., Oktaviani, M., Nurhayat, O. D., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Hand sanitizer gel formulation with laccase enzyme as an antibacterial against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Borneo Journal of Pharmacy*, 5(4), 375–383. https://doi.org/10.33084/bjop.v5i4.3683.

Anita, S. H., Ningsih, F., Mangunwardoyo, W., Hidayat, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Isolation, purification and characterization of laccase enzyme from *Trametes pavonia* EDN 134 for decolorization of azo dyes. *AIP Conference Proceedings*, 2391(1), 020022. https://doi.org/10.1063/5.0072628.

Anita, S. H., Ningsih, F., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Biodecolorization of Remazol Brilliant Blue – R dye by tropical white-rot fungi and their enzymes in the presence of guaiacol. *Jurnal Riset Kimia*, 12(2), 94–101. https://doi.org/10.25077/jrk.v12i2.388.

Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C., Ma'ruf F. A., Pradipta, M. F., & **Yanto, D. H. Y.** (2025). Covalent immobilization of *Trametes polyzona* H18 laccase enzyme on activated carbon for synthetic dye decolorization. *Microbiology Indonesia*, 18(1), 11–20.

Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Zulfiana, D., Putra, I. V., & **Yanto, D. H. Y.** (2024). Effect of contact-pesticide mancozeb on the growth, enzyme production, and morphology of white-rot fungi isolated from Berbak-Sembilang, Indonesia. *International Journal of*

Agriculture & Biology, 31, 147–154. https://doi.org/10.17957/IJAB/15.2126.

Anita, S. H., Sari, F. P., & **Yanto, D. H. Y.** (2019). Decolorization of synthetic dyes by ligninolytic enzymes from *Trametes hirsuta* D7. *Makara Journal of Science*, 23(1), 44–50. https://doi.org/10.7454/mss.v23i1.10803

Anita, S.H., **Yanto, D. H. Y.,** & Fatriasari, W. (2011). Pemanfaatan lignin hasil isolasi dari lindi hitam proses biopulping bambu betung (*Dendrocalamus asper*) sebagai media selektif jamur pelapuk putih. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 29(4), 312–321. http://dx.doi.org/10.20886/jphh.2011.29.4.312-321.

Anita, S. H., Zulfiana, D., Digita, A., Nuha, N., Syafriana, V., Febriani, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2024). The first evidence of potential antibacterial activity of laccase enzyme from Indonesian white rot fungi against pathogenic bacteria. *Hayati Journal of Biosciences*, 31(1), 133–144. https://doi.org/10.4308/hjb.31.1.133-144.

Apriani, I., **Yanto, D. H. Y.,** Hariani, P. L., Widjajanti, H. & Nurhayat, O. D. (2024). Potential of white rot fungi from Berbak-Sembilang National Park, Indonesia for decolorization and detoxification of commercial direct dyes. *Trends in Sciences*, 21(6), 7610. https://doi.org/10.48048/tis.2024.7610.

Apriani, I., **Yanto, D. H. Y.,** Hariani, P. L., Widjajanti, H. & Nurhayat, O. D. (2025). Utilization of *Leiotrametes menziesii* BRB 73 for decolorization of commercial direct dyes mixture with different culture conditions. *Nature Environment and Pollution Technology*, 24(1), D1676. https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i01.D1676.

Ardiati, F. C., Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Chempaka, R. M., **Yanto, D. H. Y.,** Watanabe, T., & Wilén, B. M. (2024). Evaluation of batch and fed-batch rotating drum biological contactor using immobilized *Trametes hirsuta* EDN 082 for non-sterile real textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(4), 113241, https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113241.

Ardiati, F. C., **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Ramadhan, K. P., Laksana, R. P. B., Harsono, S. T., Panelin, Y., & Widiyatno. (2022). Application of myco-light expanded clay aggregate for real textile wastewater treatment in a rotating drum biological contactor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1017(2022), 012023. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1017/1/012023.

Ardiati, F. C., **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., & Watanabe, T. (2019). Immobilization of *Trametes hirsuta* D7 in light expanded clay aggregate for decolorization of synthetic dye. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 308(1), 012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/308/1/012002.

Arregui, L., Ayala, M., Gómez-Gil, X., Gutiérrez-Soto, G., Hernández-Luna, C. E., Herrera de Los Santos, M., Levin, L., Rojo-Domínguez, A., Romero-Martínez, D., Saparrat, M. C. N., Trujillo-Roldán, M. A., & Valdez-Cruz, N. A. (2019). Laccases: Structure, function, and potential application in water bioremediation. *Microbial Cell Factories*, 18(1), 200. https://doi.org/10.1186/s12934-019-1248-0.

Baldrian, P. (2006). Fungal laccases—Occurrence and properties. *FEMS Microbiology Reviews*, 30(2), 215–242. https://doi.org/10.1111/j.1574-4976.2005.00010.x.

Bankeeree, W., Watanabe, T., Punnapayak, H., Lotrakul, P., Prasongsuk, S., Li, R., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Alkyl β-D-xyloside synthesis from black liquor xylan using *Aureobasidium pullulans* CBS 135684 β-xylosidases immobilized on spent expanded perlite. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(7), 2677–2686. https://doi.org/10.1007/s13399-020-00755-5.

Bappenas (2024). *Indonesian Biodiversity Strategy and Action Plan (IBSAP) 2025–2045*. Pemerintah Republik Indonesia.

Bertrand, B., Trejo-Hernández, M. R., Morales-Guzmán, D., Caspeta, L., Suárez Rodríguez, R., & Martínez-Morales, F. (2016). Functional expression, production, and biochemical characterization of a laccase using yeast surface display

technology. *Fungal Biology*, 120(12), 1609–1622. https://doi.org/10.1016/j.funbio.2016.08.009.

Chopra, N. K., Singhal, D., Saini, R., & Sondhi, S. (2023). Structure analysis and molecular docking studies of laccase from "*Bacillus licheniformis* NS2324". *Sustainable Chemistry for the Environment*, 1, 100004. https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100004.

Crestini, C., Jurasek, L., & Argyropoulos, D. S. (2003). On the mechanism of the laccase-mediator system in the oxidation of lignin. *Chemistry – A European Journal*, 9(21), 5371–5378. https://doi.org/10.1002/chem.200304818.

Ermawar, R. A., **Yanto, D. H. Y.,** Hermiati, E., & Fitria. (2006). Lignin degradation content in rice straw pre-treated by white-rot fungi. *Jurnal Widya Riset*, 9(3), 197–202.

Fujihiro, S., Higuchi, R., Hisamatsu, S., & Sonoki, S. (2009). Metabolism of hydroxylated PCB congeners by cloned laccase isoforms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 82(5), 853–860. https://doi.org/10.1007/s00253-008-1798-2.

Gianfreda, L., Xu, F., & Bollag, J.-M. (1999). Laccases: A useful group of oxidoreductive enzymes. *Bioremediation Journal*, 3(1), 1–26. https://doi.org/10.1080/10889869991219163.

Giardina, P., Faraco, V., Pezzella, C., Piscitelli, A., Vanhulle, S., & Sannia, G. (2010). Laccases: A never-ending story. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 67(3), 369–385. https://doi.org/10.1007/s00018-009-0169-1

Givaudan, A., Effosse, A., Faure, D., Potier, P., Bouillant, M.-L., & Bally, R. (1993). Polyphenol oxidase in *Azospirillum lipoferum* isolated from rice rhizosphere: Evidence for laccase activity in non-motile strains of *Azospirillum lipoferum*. *FEMS Microbiology Letters*, 108(2), 205–210. https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1993.tb06100.x.

Hidayat, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2018). Biodegradation and metabolic pathway of phenanthrene by a new tropical fungus, *Trametes*

hirsuta D7. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2454–2460. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.051.

Ilham, M., Meryandini, A., **Yanto, D. H. Y.,** Fuad, A. M., Laksmi, F. A., Rahmani, N., Nurhayat, O. D., & Watanabe, T. (2026). Isolation and in silico studies of a laccase gene from *Trametes hirsuta* EDN 082: Structural and functional analysis for bioremediation of synthetic dyes. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, e12435. https://doi.org/10.55251/jmbfs.12435.

Januzs, G., Pawlik, A., Świderska-Burek, U., Polak, J., Sulej, J., Jarosz-Wilkołazka, A., & Paszczyński, A. (2020). Laccase properties, physiological functions, and evolution. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(3), 966. https://doi.org/10.3390/ijms21030966.

Jia, Y., Huang, Q., Zhu, L., & Pan, C. (2022). Characterization of a recombinant laccase B from *Trametes hirsuta* MX2 and its application for decolorization of dyes. *Molecules*, 27(5), 1581. https://doi.org/10.3390/molecules27051581

Karimah, S. N., **Yanto, D. H. Y.,** Rahayu, G., & Nurhayat, O. D. (2025). The potential of white rot fungi from Indonesia for biodegradation of expanded polystyrene. *Bioremediation Journal*, 29(4), 367–380. https://doi.org/10.1080/10889868.2024.2355187.

Karimah, S. N., **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Ilham, M., Diansari, A., & Reynata, R. (In press). Development and evaluation of laccase-based toothpaste for enhanced antibacterial and whitening effect. *Indonesian Journal of Pharmacy*. https://doi.org/10.22146/ijp.21867.

Kües, U., & Rühl, M. (2011). Multiple multi-copper oxidase gene families in basidiomycetes—What for? *Current Genomics*, 12(2), 72–94. https://doi.org/10.2174/138920211795564377.

Lu, L., Zhao, M., & Wang, Y. (2007). Immobilization of laccase by alginate–chitosan microcapsule and its use in dye decolorization. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23, 159–166. https://doi.org/10.1007/s11274-006-9205-6.

Luna-Acosta, A., Rosenfeld, E., Amari, M., Fruitier-Arnaudin, I., Bustamante, P., & Thomas-Guyon, H. (2010). First evidence of laccase activity in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*. *Fish & Shellfish Immunology*, 28(4), 719–726. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2010.01.008.

Mate, D. M., & Alcalde, M. (2015). Laccase engineering: From rational design to directed evolution. *Biotechnology Advances*, 33(1), 25–40. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.12.007.

Matula, S. (2024). Physico-chemical treatment for removing contaminants and toxicity in wastewater. *Journal of Research in Environmental Science and Toxicology*, 13(6). https://doi.org/10.14303/2315-5698.2024.723.

Maulita, F., Meryandini, A., **Yanto, D. H. Y.,** Listiyowati, S., Oktaviani, M., & Nurhayat, O. D. (2025). Enzymatic degradation of oil palm empty fruit bunch fiber using laccase from *Trametes hirsuta* EDN 082. *AIP Conference Proceedings*, 3186(1), 020048. https://doi.org/10.1063/5.0234710.

Minuth, W., Klischies, M., & Esser, K. (1978). The phenoloxidases of the ascomycete *Podospora anserina*: Structural differences between laccases of high and low molecular weight. *European Journal of Biochemistry*, 90(1), 73–82. https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1978.tb12576.x.

Morozova, O. V., Shumakovich, G. P., Shleev, S. V., & Yaropolov, Y. I. (2007). Laccase mediator systems and their applications: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 43, 523–535. https://doi.org/10.1134/S0003683807050055.

Mot, A. C., & Silaghi-Dumitrescu, R. (2012). Laccases: Complex architectures for one-electron oxidations. *Biochemistry (Moscow)*, 77(12), 1395–1407. https://doi.org/10.1134/S0006297912120085.

Nadhilah, D. Andriani, A., Agustriana, E., Nuryana, I., Mubarik, N. R., Dewi, K. S., Rahmani, N., **Yanto, D. H. Y.,** Ismayati, M., Perwitasari, U., Laksmi, F. A., & Wijaya, H. (2024). Co-catalysis of melanin degradation by laccase-manganese peroxidase

complex from *Trametes hirsuta* OK271075 for application in whitening cosmetics. *Biocatalysis and Biotransformation*, 42(2), 273–285. https://doi.org/10.1080/10242422.2023.2188995.

Naser, I. H. N., Kemala, T., **Yanto, D. H. Y.,** Purwaningsih, H., Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C., Bakar, N. H. H. A., & Iqbal, A. (2025). Decolorization of synthetic dyes by laccase of *Phellinus noxius* BRB 11 immobilized with halloysite nanotubes. *Science & Technology Indonesia*, 10(2), 644–659. https://doi.org/10.26554/sti.2025.10.2.644-659.

Ningsih, F., **Yanto, D. H. Y.,** Mangunwardoyo, W., Anita, S. H., & Watanabe, T. (2020). Optimization of lacease production from a newly isolated *Trametes* sp. EDN134. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 572(1), 012024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/572/1/012024.

Nurhayat, O. D., Anita, S. H., & **Yanto, D. H. Y.** (2020). Potensi cendawan pelapuk putih Indonesia sebagai agen biodekolorisasi limbah pewarna sintetik: artikel ulasan. *Jurnal Mikologi Indonesia*, 4(1), 156–167.

Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C., Ramadhan, K. P., Anita, S. H., Okano, H., Watanabe, T., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Bioprospecting three newly isolated white-rot fungi from Berbak-Sembilang National Park, Indonesia for biodecolorization of anthraquinone and azo dyes. *Biodiversitas*, 23(2), 613–623. https://doi.org/10.13057/biodiv/d230201.

Nurhayat, O. D., Putra, I. P., Anita, S. H., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Notes some macro fungi from Taman Eden 100, Kawasan Toba, Sumatera Utara, Indonesia: Description and its potency. *Bioeduscience*, 5(1), 30–39. https://doi.org/10.22236/j.bes/515326.

Oktaviani, M., Damin, B. C. S., Rusdiarso, R., Masruchin, N., Suryanegara, L., & **Yanto, D. H. Y.** (2023). Decolorization of methylene blue dye by laccase and mycelia from *Trametes hirsuta* EDN 082 immobilized on alginate-nanocellulose beads.

AIP Conference Proceedings, 2913(1), 020009. https://doi.org/10.1063/5.0171715.

Oktaviani, M., Damin, B. C. S., Suryanegara, L., **Yanto, D. H. Y.,** & Watanabe, T. (2024). Immobilization of fungal mycelial and laccase from *Trametes hirsuta* EDN082 in alginate-cellulose beads and its use in Remazol Brilliant Blue R dye decolorization. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101828. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101828.

Oktaviani, M., Hi-Pattu, A. N., Zulfiana, D., Karimah, S. N., Ilham, M., & **Yanto, D. H. Y.** (2026). Biodegradation of trimethoprim antibiotic by white rot fungus *Trametes hirsuta* D7 and its laccase: quantitative analysis, molecular docking, and metabolic pathway. *Journal of Environmental Science and Health*, Part A, 1–15. https://doi.org/10.1080/10934529.2026.2692270.

Oktaviani, M., Solihat, N. N., Amin, Y., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Produksi enzim ligninolitik dan dekolorisasi pewarna sintetis oleh isolat baru jamur tropis *Cymatoderma dendriticum* WM01. *Al-Kauniyah Jurnal Biologi*, 14(2), 282–293. https://doi.org/10.15408/kauniyah.v14i2.17184

Oktaviani, M., & **Yanto, D. H. Y.** (2016). Biodecolorization of textile dye by isolated tropical fungi. *Proceedings of International Conference of Indonesian Forestry Researchers III-2015*, Bogor, 21-22 October 2015, 276–285.

Patel, A. K., Singhania, R. R., Albarico, F. P. J. B., Pandey, A., Chen, C.-W., & Dong, C.-D. (2022). Organic wastes bioremediation and its changing prospects. *Science of the Total Environment*, 824, 153889. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153889.

Pattu, A. N. H., Charlena, **Yanto, D. H. Y.,** Suprapto, I. H., & Oktaviani, M. (2024). Biodegradation of the ciprofloxacin antibiotic by white rot fungus *Trametes hirsuta* D7. Jurnal *Kimia Sains dan Aplikasi*, 27(12), 590–596. https://doi.org/10.14710/jksa.27.12.590-596.

Pezzella, C., Lettera, V., Piscitelli, A., Giardina, P., & Sannia, G. (2013). Transcriptional analysis of *Pleurotus ostreatus* laccase

genes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(2), 705–717. https://doi.org/10.1007/s00253-012-3980-9.

Ramadhan, K. P., Anita, S. H., Oktaviani, M., Laksana, R. P. B., Sari, F. P., Nurhayat, O. D., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Biodecolorization of anthraquinone and azo dyes by newly isolated Indonesian white-rot fungi. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, 13(1), 16–25. https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v13i1.26148.

Ramadhan, K. P., **Yanto, D. H. Y.,** & Teh, A. H. (2025). Characterization of laccase from *Salipiger* sp. CCB-MM3 with decolorization activity against azo, anthraquinone, and triarylmethane dyes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 69, 103757. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103757.

Shahedi, M., Shahani, R., Habibi, Z., Yousefi, M., Brask, J., Minaei-Tehrani, A., Samadi, F. Y., & Mohammadi, M. (2022). Diarylation of thiazolopyrimidines by laccase and their in vitro evaluation as antitumor agents. *Scientific Reports*, 12, 22326. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26820-9.

Samsuria, N. N. C., Ismail, W. Z. W., Mohamed Nazli, M. N. W., Aziz, N. A. A., & Ghazali, A. K. (2025). Problems, effects, and methods of monitoring and sensing oil pollution in water: A review. *Water*, 17(9), 1252. https://doi.org/10.3390/w17091252.

Sari, A. A., Pertiwi, S., & **Yanto, D. H. Y.** (2023). Potential co-culture of fungi in degradation of 1,4-dioxane. Frontiers in Water and Environment, 1(1), 35–46.

Sari, F. P., Tahar, M., Mardiyanti, R., Oktaviani, M., Anita, S. H., Laksana, R. P. B., & **Yanto, D. H. Y.** (2019a). Enzim ligninolitik sebagai agen biodekolorisasi dari jamur pelapuk putih dengan biomassa lignoselulosa sebagai media tumbuh. *Prosiding Seminar Lignoselulosa 18*, 120–126. Cibinong, 19 September 2018.

Sari, F. P., **Yanto, D. H. Y.,** & Pari, G. (2019b). Activated carbon derived from OPEFB by one-step steam activation and its application for dye adsorption: Kinetics and isothermal studies. *Reaktor*, 19(2), 67–75. https://doi.org/10.14710/reaktor.19.2.68-76.

Savinova, O. S., Moiseenko, K. V., Vavilova, E. A., Chulkin, A. M., Fedorova, T. V., Tyazhelova, T. V., & Vasina, D. V. (2019). Evolutionary relationships between the laccase genes of *Polyporales*: Orthology-based classification of laccase isozymes and functional insight from *Trametes hirsuta*. *Frontiers in Microbiology*, 10, 152. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00152.

Strong, P. J., & Claus, H. (2011). Laccase: A review of its past and its future in bioremediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(4), 373–434. https://doi.org/10.1080/10643380902945706.

Tong, P., Hong, Y., Xiao, Y., Zhang, M., Tu, X., & Cui, T. (2007). High production of laccase by a new basidiomycete, *Trametes* sp. *Biotechnology Letters*, 29(2), 295–301. https://doi.org/10.1007/s10529-006-9241-1.

Wang, X., Jiang, J., & Gao, W. (2022). Reviewing textile wastewater produced by industries: Characteristics, environmental impacts, and treatment strategies. *Water Science & Technology, 85*(7), 2076–2093. https://doi.org/10.2166/wst.2022.088.

Yamazaki, H. I. (1969). The cuticular phenoloxidase in *Drosophila virilis*. *Journal of Insect Physiology*, 15(12), 2203–2211. https://doi.org/10.1016/0022-1910(69)90237-6

Yanto, D. H. Y., Anita, S. H., & Solihat, N. N. (2024). Enzymatic degradation and metabolic pathway of acid blue 129 dye by crude laccase from newly isolated *Trametes hirsuta* EDN 082. *Biocatalysis and Biotransformation*, 42(2), 129 – 139. https://doi.org/10.1080/10242422.2022.2138360.

Yanto, D. H. Y., Auliana, N., Anita, S. H., & Watanabe, T. (2019) Decolorization of synthetic dyes by laccase from newly isolated *Trametes hirsuta* EDN084 mediated by violuric acid. IOP Conference Proceedings: Earth and Environmental Science 374(1):012005. http://doi.org/10.1088/1755-1315/374/1/012005.

Yanto, D. H. Y., Chempaka, R. M., Nurhayat, O. D., Argo, B. D., Watanabe, T., Wibisono, Y., & Hung, Y. T. (2023). Optimization of dye-contaminated wastewater treatment by fungal mycelial-light

expanded clay aggregate composite. *Environmental Research*, 231, 116207. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116207.

Yanto, D. H. Y., Guntoro, M. A., Nurhayat, O. D., Anita, S. H., Oktaviani, M., Ramadhan, K. P., Pradipta, M. F., & Watanabe, T. (2021). Biodegradation and biodetoxification of batik dye wastewater by laccase from *Trametes hirsuta* EDN 082 immobilised on light expanded clay aggregate. *3 Biotech*, 11(5), 247. https://doi.org/10.1007/s13205-021-02806-8.

Yanto, D. H. Y., & Hidayat, A. (2020). Biodegradation of buried crude oil in soil microcosm by fungal co-culture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1), 012084. https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012084.

Yanto, D. H. Y., Hidayat, A., & Tachibana, S. (2017). Periodical biostimulation with nutrient addition and bioaugmentation using mixed fungal cultures to maintain enzymatic oxidation during extended bioremediation of oily soil microcosms. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 116, 112–123. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.023.

Yanto, D. H. Y., Krishanti, N. P. R. A., Ardiati, F. C., Anita, S. H., Nugraha, I. K., Sari, F. P., Laksana, R. P. B., Sapardi, S., & Watanabe, T. (2019). Biodegradation of styrofoam waste by ligninolytic fungi and bacteria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 308(1), 012001. https://doi.org/10.1088/1755-1315/308/1/012001.

Yanto, D. H. Y., & Tachibana, S. (2015). Double-layer immobilized manganese peroxidase from *Pleurotus ostreatus* effectively enhanced the biodecolorization of remazol brilliant blue R dye. *Proceedings of International Conference of Indonesian Forestry Researchers III-2015*, Bogor, 21-22 October 2015, 269–275.

Yanto, D. H. Y., & Tachibana, S. (2016). Utilization of kapok fiber as a natural sorbent in petroleum hydrocarbon biodegradation by *Pestalotiopsis* sp. Journal of Lignocellulose Technology, 1(1), 68–73.

Yanto, D. H. Y., & Tachibana, S. (2014). Potential of fungal co-culturing for accelerated biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 278, 454–463. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.039.

Yanto, D. H. Y., & Tachibana, S. (2014). Enhanced biodegradation of asphalt in the presence of Tween surfactants, Mn^{2+} and H_2O_2 by *Pestalotiopsis* sp. in liquid medium and soil. *Chemosphere*, 103, 105–113. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.044.

Yanto, D. H. Y., & Tachibana, S. (2013). Biodegradation of petroleum hydrocarbons by a newly isolated *Pestalotiopsis* sp. NG007. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 438–450. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.09.008.

Yanto, D. H. Y., Tachibana, S., & Itoh, K. (2014). Biodecolorization and biodegradation of textile dyes by the newly isolated saline-pH-tolerant fungus *Pestalotiopsis* sp. NG007. *Journal of Environmental Science and Technology*, 7(1), 44–55. https://doi.org/10.3923/jest.2014.44.55.

Yanto, D. H. Y., Tachibana, S., & Itoh, K. (2014). Biodecolorization of textile dyes by immobilized enzymes in a vertical bioreactor system. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 235–244. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.030.

Yanto, D. H. Y., Zahara, S., Laksana, R. P. B., Anita, S. H., Oktaviani, M., & Sari, F. P. (2017). Development of PVA-alginate as a matrix for enzymatic decolorization of textile dye in a bioreactor system. AIP Conference Proceedings, 1803(1), 020062. https://doi.org/10.1063/1.4973189.

Yaver, D. S., Xu, F., Golightly, E. J., Brown, K. M., Brown, S. H., Rey, M. W., Schneider, P., Halkier, T., Mondorf, K., & Dalbøge, H. (1996). Purification, characterization, molecular cloning, and expression of two laccase genes from the white rot basidiomycete *Trametes villosa*. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(3), 834–841. https://doi.org/10.1128/aem.62.3.834-841.1996.

Zalkifal, M., **Yanto, D. H. Y.,** Rahayu, G., Nurhayat, O. D., & Watanabe, T. (2025). Biodegradation and biodetoxification of

a phenanthrene mixture with anthracene and benzo(a)pyrene; and in-depth study on *Phellinus noxius* BRB 11 potentials, isolated from Berbak-Sembilang Biosphere Reserve, Indonesia. *Biocatalysis and Biotransformation*, 43(2), 207–217. https://doi.org/10.1080/10242422.2025.2455574.

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Karya Tulis Ilmiah

1.	Bagian dari Buku Internasional	2 buah
2.	Jurnal Internasional	82 buah
3.	Jurnal Nasional	21 buah
4.	Prosiding Internasional	20 buah
5.	Prosiding Nasional	5 buah

Kekayaan Intelektual

6.	Paten Internasional	3 buah
	a. Terdaftar	3 buah
7.	Paten Nasional	22 buah
	a. Terdaftar	15 buah
	b. Tersertifikasi	7 buah

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Karya Tulis Ilmiah

Bagian dari Buku Internasional

1. Iqbal, A., **Yanto, D. H. Y.,** Mohammad-Noor, N., Thoha, H., Ismail, M. W., Abu Bakar, N. H. H., Roziawati, M. R., Abu-Romman, S., & Sweiss, M. A. (2024). Chapter 8: Application of nanoparticles in the mitigation of harmful algal blooms. Dalam P. S. Goh, et al. (Eds.) Chemistry in the environment. Advanced materials for emerging water pollutant removal. (208–222). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/9781837675425-00208.
2. Andriani, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2024). Fungal applications in skincare products. Dalam E.T. Arung et al. (Eds.) Biomass-based cosmetics. Research Trends and Future Outlook, (113–132). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1908-2_5.

Jurnal Internasional

3. Miyazaki, R., Kohga, H., Matsuoka, N., Maruno, Y., Yoshimoto, W., Takahashi, Y. S., **Yanto, D. H. Y.,** Nugraha, Y., Shigematsu, H., Shiota, T., & Tsukazaki, T. (2026). Cryo-EM structures of the SurA-BAM complex reveal conformational changes in outer membrane protein assembly. *Nature Communications*, 17, 9061. https://doi.org/10.1038/s41467-026-76843-3.
4. Oktaviani, M., Hi-Pattu, A. N., Zulfiana, D., Karimah, S. N., Ilham, M., & **Yanto, D. H. Y.** (2026). Biodegradation of trimethoprim antibiotic by white rot fungus *Trametes hirsuta* D7 and its laccase: quantitative analysis, molecular docking, and metabolic pathway. *Journal of Environmental Science and Health*, Part A, 1–15. https://doi.org/10.1080/10934529.2026.2692270.

5. Ilham, M., Meryandini, A., **Yanto, D. H. Y.,** Fuad, A. M., Laksmi, F. A., Rahmani, N., Nurhayat, O. D., & Watanabe, T. (2026). Isolation and in silico studies of a laccase gene from *Trametes hirsuta* EDN 082: Structural and functional analysis for bioremediation of synthetic dyes. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, e12435. https://doi.org/10.55251/jmbfs.12435.
6. Al-Momani, A. N., Iqbal, A., **Yanto, D. H. Y.,** Karimah, S. N., Khairuddean, M., Jazzazi, T. M. A., Ching, P. S., Haisen, L., Abdullah, M., Putra, A. B. N., Palupi, K. D., & Thimizir, M. Z. A. (2026). Microwave-assisted synthtesis of laccase of *Trametes hirsuta*–derived carbon dots for ciprofloxin detection. *Chemistry Africa*, 9(1), 34. https://doi.org/10.1007/s42250-025-01572-x.
7. Kamaraj, C., **Yanto, D. H. Y.,** Kumarasamy, V., Al-Ghanim, K. A., Subramaniyan, V., Wong, L. S., & Vetrivel, C. (2026). Magnesium oxide nanoparticles loaded with 6-gingerol: A bioinspired approach to anticancer, anti-inflammatory, and antioxidant therapy. *International Journal of Nanomedicine*, 21, 1–22. https://doi.org/10.2147/IJN.S531933.
8. Manimaran, K., Rojviroon, T., Rojviroon, O., Rajendran, R., **Yanto, D. H. Y.,** Vankatesh, G., Segaran, G., & Niamlang, S. (2026). Synthesis and characterization of gold nanoparticles (AuNPs) using *Lentinus sajor*-caju extract: A multifaceted approach to antibacterial, anticancer and photocatalytic degradation efficiency. *South African Journal of Botany*, 196, 89–102. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2026.05.027.
9. Karimah, S. N., **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Ilham, M., Diansari, A., & Reynata, R. (In press). Development and evaluation of laccase-based toothpaste for enhanced antibacterial and whitening effect. *Indonesian Journal of Pharmacy.*
10. Wibisono, T., Anggraeni, E. T., Alvianto, D., Ummah, S. R., **Yanto, D. H. Y.,** Kurniawan, T. A., Tajarudin, H. A., & Nugroho, W. A. (2025). Valorization of agricultural waste through microbial fermentation into industrial-grade bio-succinic acid: A review.

Biomass and Bioenergy, 202:108183. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108183.

11. Kamaraj, C., **Yanto, D. H. Y.,** Ragavendran, C, Vimal, S., Naveenkumar, S., & Sigamani, S. (2025). *Ganoderma lucidum* engineered Mg-ZnO nanoparticles via RSM: Green nanomedicine targeting triple-negative breast cancer. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.12.022.
12. Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C., Ma'ruf F. A., Pradipta, M. F., & **Yanto, D. H. Y.** (2025). Covalent immobilization of *Trametes polyzona* H18 laccase enzyme on activated carbon for synthetic dye decolorization. *Microbiology Indonesia*, 18(1), 11–20.
13. Karimah, S. N., **Yanto, D. H. Y.,** Rahayu, G., & Nurhayat, O. D. (2025). The potential of white rot fungi from Indonesia for biodegradation of expanded polystyrene. *Bioremediation Journal*, 29(4), 367–380. https://doi.org/10.1080/10889868.2024.2355187.
14. Manimaran, K., Rojviroon, T., Rojviroon, O., Rajendran, r., **Yanto, D. H. Y.,** Venkatesh, G., & Segaran, G., Niamlang, S. (2025). Advances in metal nanofabrication using microbial exopolysaccharides: emerging biomedical applications. *International Journal of Pharmaceutics*, 126232. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.126232.
15. Phoon, S. C., Iqbal, A., Ida, J., **Yanto, D. H. Y**., Yusop, M. R., Hussin, M. H., & Rajappan, K. (2025). Microwave irradiation time-dependent tuning of the physicochemical properties and photocatalytic activity of SnO2 quantum dots for tetracycline photodegradation. *Results in Engineering*, 27:105721. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105721.
16. Ramadhan, K. P., **Yanto, D. H. Y.,** & Teh, A. H. (2025). Characterization of laccase from *Salipiger* sp. CCB-MM3 with decolorization activity against azo, anthraquinone and

triarylmethane dyes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 69, 103757. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103757.

17. Andriani, D., Andriyani, R., Prabandani, A., Yuniati, M. D., **Yanto, D. H. Y.,** Zaidi, N. S., & Puteh, M. H. (2025). Characterization and treatment methods of hazardous compounds in batik wastewater: a review. *International Journal of Environmental Research*, 19(3), 83. https://doi.org/10.1007/s42250-025-01572-x.
18. Naser, I. H. N., Kemala, T., **Yanto, D. H. Y.,** Purwaningsih, H., Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C., Bakar, N. H. H. A., & Iqbal, A. (2025). Decolorization of synthetic dyes by laccase of *Phellinus noxius* BRB 11 immobilized with halloysite nanotubes. *Science & Technology Indonesia*, 10(2), 644–659. https://doi.org/10.26554/sti.2025.10.2.644-659.
19. Shah, S. T., Sari, I. P., **Yanto, D. H. Y**., Chowdhury, Z. Z., Bashir, M. N., Badruddin, I. A., Hussien, M., & Lee, J. S. (2025). Nature's nanofactories: biogenic synthesis of metal nanoparticles for sustainable technologies. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 18(1), 2448171. https://doi.org/10.1080/17518253.2024.244817.
20. Kamaraj, C., Selvam, N., **Yanto, D. H. Y.,** Dhanush, C., Arun, V., Prem, P., Boomija, R. V., Sigamani, S., Kanniappan, V., Ramachandran, R., & Alwi, R. S. (2025). Sustainable biofabrication of nanobiotic-ZnO using *Zaleya pentandra*: Pan-functional applications and safety profiling. *Surface and Interface*, 107671. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.107671.
21. Zalkifal, M., **Yanto, D. H. Y.,** Rahayu, G., Nurhayat, O. D., & Watanabe, T. (2025). Biodegradation and biodetoxification of phenanthrene mixture with anthracene and benzo(a)pyrene; and an in-depth study on *Phellinus noxius* BRB 11 potentials, isolated from Berbak-Sembilang Biosphere Reserve, Indonesia. *Biocatalysis and Biotransformation*, 43(2), 207–217. https://doi.org/10.1080/10242422.2025.2455574.
22. Prayodi, R., Putra, H., Yasuhara, H., Simatupang, M., Ihsani, Z. M., **Yanto, D. H. Y.,** & Daryono, L. R. (2025). Influence

of soybean and reagent concentration on characteristics of precipitated materials. *Journal of GeoEngineering,* 20(2), 16–28. https://doi.org/10.6310/jog.202503_20(1).0002.

23. Putra, H., Sulistiawati, B.H., **Yanto, D.H.Y.,** Fauzan, & Basuki, A. (2025). Efficacy of soybean extract using different methods in calcite precipitation for soil improvement. *Civil Engineering and Architecture,* 13(2), 826–837. https://doi.org/10.13189/cea.2025.130206.
24. Apriani, I., **Yanto, D. H. Y.,** Hariani, P. L., Widjajanti, H., & Nurhayat, O. D. (2025). Utilization of *Leiotrametes menziesii* BRB 73 for decolorization of commercial direct dyes mixture with different culture conditions. *Nature Environment and Pollution Technology*, 24(1), D1676. https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i01.D1676.
25. Simatupang, M., Edwin, R. S., Sulha, S., Putra, H., & **Yanto, D. H. Y.** (2025). The evolution of the hydraulic conductivity of fly ash-treated sand as a liquefaction countermeasure. *Indian Geotechnical Journal,* 55(1), 92–106. https://doi.org/10.1007/s40098-024-00917-6.
26. Manimegalai, G., Selvaraj, K., Yu, B., Kumar, M., Muthaiah, C., Panneerselvam, S., Arulraj, A., Mangalaraja, R. V., Habila, M., Allohedan, H., **Yanto, D. H. Y.,** & Arumugam, D. B. (2025). *Acorus calamus*-mediated CuFe2O4/reduced graphene oxide (AcL-CF-G) nanocomposite and its versatile biomedical and environmental remediation applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 147, 278–292. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.12.019.
27. Alam, R., Mahmood, R. A., **Yanto, D. H. Y.,** Kim, M. S., & Kim, S. (2025). Direct detection of textile dyes in environmental samples by LDI and MALDI FT-ICR MS. *Analytical Chemistry*, 97(31), 16723–16732. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5c00052.
28. Ganesan, M., Muthaiah, C., Manimaran, K., Kumar, S., **Yanto, D. H. Y.,** AlAnazi, K. M., Arulraj, A., Paunkumar, P., &

Mangalaraja, R. V. (2024). Biosynthesis and characterization of *Lissachatina fulica* snail mucus (LfSM)-mediated iron oxide (Fe2O3) nanoparticles: antibacterial and anticancer efficiency. *South African Journal of Botany*, 175, 732–743. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.10.045.

29. Manimaran, K., **Yanto, D. H. Y.,** Sari, I. P., Karimah, S. N., Kamaraj, C., Manoharadas, S., Praburaman, S., Suganthi, S., & Oh, T. H. (2024). Novel approaches of mycosynthesized zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) using *Pleurotus sajor-caju* extract and their biological and environmental applications. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(10), 423. https://doi.org/10.1007/s10653-024-02185-y.
30. Alam, R., Naznin, M., Ardiati, F. C., Solihat, N. N., Anita, S. H., Purnomo, D., **Yanto, D. H. Y.,** & Kim, S. (2024). Targeted and non-targeted identification of dye and chemical contaminants in Loji River, Indonesia using FT-ICR-MS. *Chemosphere*, 365, 143324. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143324.
31. Ganesan, M., Muthaiah, C., Wadaan, M. A., Manimaran, K., **Yanto, D. H. Y.,** Kumar, S., Selvankumar, T., Arulraj, A., Mangalaraja, R. V., & Suganthi, S. (2024). Synthesis and characterization of fluorinated graphene oxide nanosheets derived from *Lissachatina fulica* snail mucus and their biomedical applications. *Luminescence*, 39(9), e4875. https://doi.org/10.1002/bio.4875.
32. Ardiati, F. C., Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Chempaka, R. M., **Yanto, D. H. Y.,** Watanabe, T., & Wilén, B. M. (2024). Evaluation of batch and fed-batch rotating drum biological contactor using immobilized *Trametes hirsuta* EDN082 for non-sterile real textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(4), 113241, https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113241.
33. Ali, E. M., Iqbal, A., Ibrahim, M. N. M., Alheety, M. A., Ahmed, N. M., **Yanto, D. H. Y.,** & Zainul, R. (2024). Magnetic attapulgite synthesized via sonochemistry: an innovative strategy

for efficient solid phase extraction of As3+ from simulated and unrefined crude oil samples. *Journal of Porous Materials*, 31(4), 1183–1195. https://doi.org/10.1007/s10934-024-01581-0.

34. Oktaviani, M., Damin, B. C. S., Suryanegara, L., **Yanto, D. H. Y.,** & Watanabe, T. (2024). Immobilization of fungal mycelial and laccase from *Trametes hirsuta* EDN082 in alginate-cellulose beads and its use in Remazol Brilliant Blue R dye decolorization. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101828. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101828.
35. Manimaran, K., **Yanto, D. H. Y.,** Govindasamy, M., Karunanithi, B., Alasmary, F. A., & Habab, R. A. (2024). Biological synthesis and characterization of iron oxide (FeO) nanoparticles using *Pleurotus citrinopileatus* extract and its biomedical applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(11), 12575–12585. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04382-8.
36. Apriani, I., **Yanto, D. H. Y.,** Hariani, P. L., Widjajanti, H., & Nurhayat, O. D. (2024). Potential of white rot fungi from Berbak-Sembilang National Park, Indonesia for decolorization and detoxification of commercial direct dyes. *Trends in Sciences*, 21(6), 7610. https://doi.org/10.48048/tis.2024.7610.
37. Afrida, S., Kumalasari, P. I., Sinaga, J. F., **Yanto, D. H. Y.,** Horisawa, S., & Tamai, Y. (2024). Crude Oil Biodegradation performance in natural seawater of a *Trichoderma species* from decaying mangrove wood in East Kalimantan. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(5), 450–462. https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i54542.
38. Nadhilah, D. Andriani, A., Agustriana, E., Nuryana, I., Mubarik, N. R., Dewi, K. S., Rahmani, N., **Yanto, D. H. Y.,** Ismayati, M., Perwitasari, U., Laksmi, F. A., & Wijaya, H. (2024). Co-catalysis of melanin degradation by laccase-manganese peroxidase complex from *Trametes hirsuta* OK271075 for application in whitening cosmetics. *Biocatalysis and Biotransformation*, 42(2), 273–285. https://doi.org/10.1080/10242422.2023.2188995.

39. **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., & Solihat, N. N. (2024). Enzymatic degradation and metabolic pathway of acid blue 129 dye by crude laccase from newly isolated *Trametes hirsuta* EDN 082. *Biocatalysis and Biotransformation*, 42(2), 129 – 139. https://doi.org/10.1080/10242422.2022.2138360.

40. Jasni, N., Iqbal, A., Abu Bakar, N. H. H., Kanakaraju, D., **Yanto, D. H. Y.,** Yusop, M. R., & Ariyanta, H. A. (2024). Quantum-sized chitosan modified ZnO for the photocatalytic oxidation of oxytetracycline under fluorescent light irradiation. *Journal of Cluster Science*, 35(2), 607–621. https://doi.org/10.1007/s10876-023-02507-7.

41. Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Zulfiana, D., Putra, I. V., & **Yanto, D. H. Y.** (2024). Effect of contact-pesticide mancozeb on the growth, enzyme production, and morphology of white-rot fungi isolated from Berbak-Sembilang, Indonesia. *International Journal of Agriculture & Biology*, 31, 147–154. https://doi.org/10.17957/IJAB/15.2126.

42. Anita, S. H., Zulfiana, D., Digita, A., Nuha, N., Syafriana, V., Febriani, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2024). The first evidence of potential antibacterial activity of laccase enzyme from Indonesian white rot fungi against pathogenic bacteria. *Hayati Journal of Biosciences*, 31(1), 133–144. https://doi.org/10.4308/hjb.31.1.133-144.

43. Manimaran, K., **Yanto, D. H. Y.,** Ardiati, F. C., Oktaviani, M., Natarajan, D., Ragavendran, C., Kamaraj, C., Karunanithi, B., & Loganathan, S. (2023). Enhanced photocatalytic degradation, antimicrobial, and anticancer efficiency of mycosynthesized TiO2 nanoparticles using Pleurotus ostreatus mushroom extract: An eco-friendly approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering,* 11(6), 111512. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111512.

44. Santhoshkumar, T., Govindarajan, R. K., Kamaraj, C., Alharbi, N. S., Manimaran, K., **Yanto, D. H. Y.,** Subramaniyan, V., & Baek, K. H. (2023). Biological synthesis of nickel nanoparticles using

extracellular metabolites of Bacillus Sphaericus: Characterization and vector-borne disease control applications. *South African Journal of Botany*, 162, 481–494. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.09.037.

45. Istikowati, W. T., Sutiya, B., Lestari, P. Arsyad, A., Adi, D. S., Fatriasari, W., Ningrum, R. S., & **Yanto, D. H. Y.** (2023). Chemical content and anatomical characteristics of sago (*Metroxylon sagu* Rottb.) frond from South Kalimantan, Indonesia. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 10(2), 185–194. https://doi.org/10.59465/ijfr.2023.10.2.185-194.
46. Jasni, N., Iqbal, A., Abu Bakar, N. H. H., **Yanto, D. H. Y.,** Yi, H. J., Kaus, N. H. M., Ahmad, M. N., & Mulijani, S. (2023). Highly porous Bi (III) modified rice husk silica photocatalyst for the photocatalytic removal of cationic methylene blue. *Iranian Journal of Catalysis*, 13(3), 359–372. https://doi.org/10.30495/ijc.2023.1992759.2033.
47. Manimaran, K., **Yanto, D. H. Y.,** Kamaraj, C. Selvaraj, K., Pandiaraj, S., Elgorban, A. M., Vignesh, S., & Kim, H. (2023). Eco-friendly approaches of mycosynthesized copper oxide nanoparticles (CuONPs) using *Pleurotus citrinopileatus* mushroom extracts and their biological applications. *Environmental Research*, 232, 116319. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116319.
48. Oktiarni, D., Hermansyah, H., Ibrahim, E., Marsi, M., Hasanudin, H., Miksusanti, M., **Yanto, D. H. Y.,** Rahmani, N., & Kasmiarti, G. (2023). The isolation of *Klebsiella variicola*'s cellulase from *Macrotermes gilvus* gut in Indralaya Peatlands, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 24(8), 4218–4222. https://doi.org/10.13057/biodiv/d240802.
49. **Yanto, D. H. Y.,** Chempaka, R. M., Nurhayat, O. D., Argo, B. D., Watanabe, T., Wibisono, Y., & Hung, Y. T. (2023). Optimization of dye-contaminated wastewater treatment by fungal mycelial-light expanded clay aggregate composite. *Environmental Research,* 231, 116207. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116207.

50. Adithama, R. M., Munifah, I., **Yanto, D. H. Y.,** & Meryandini, A. (2023). Biodegradation of low-density polyethylene microplastic by new halotolerant bacteria isolated from saline mud in Bledug Kuwu, Indonesia. *Bioresource Technology Reports,* 22, 101466. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101466.
51. Melati, I., Rahayu, G., Surono, Effendi, H., Henny, C., & **Yanto, D. H. Y.** (2023). Biodecolorization of anthraquinone and azo dyes by dark septate endophytic fungi. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101427. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101427.
52. Alam, R., Mahmood, R. A., Islam, S., Ardiati, F. C., Solihat, N. N., Alam, M. B., Lee, S. H., **Yanto, D. H. Y.,** & Kim, S. (2023). Understanding the biodegradation pathways of azo dyes by immobilized white-rot fungus, *Trametes hirsuta* D7, using UPLC-PDA-FTICR MS supported by in silico simulations and toxicity assessment. *Chemosphere*, 313, 137505. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137505.
53. Setianto, W. B., Yohanes, H., Atmaji, G., **Yanto, D. H. Y.,** Wulandari, E. P., Wiranata, A., & Ibrahim, B. (2023). Characterization of natural rubber, styrene butadiene rubber, and nitrile butadiene rubber monomer blend composites loaded with zinc stearate to be used in the solid tire industry. *Applied Science*, 13(3), 1277. https://doi.org/10.3390/app13031277.
54. Sari, A. A., Pertiwi, S., & **Yanto, D. H. Y.** (2023). Potential co-culture of fungi in degradation of 1,4-dioxane. *Frontiers in Water and Environment*, 1(1), 35–46. https://www.akademiabaru.com/submit/index.php/fwe/article/view/3809.
55. Anita, S.H., Asishe, A., Syafriana, V., Febriani, A., Zulfiana, D., Oktaviani, M., Nurhayat, O.D., & **Yanto, D.H.Y.** (2022). Hand sanitizer gel formulation with laccase enzyme as an antibacterial against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Borneo Journal of Pharmacy*, 5, 375–383. https://doi.org/10.33084/bjop.v5i4.3683.

56. Oktafiani, P. G., Putra, H., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Application of technical grade reagent in soybean-crude urease calcite precipitation (SCU-CP) method for soil improvement technique. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103292. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103292.

57. Simatupang, M., Edwin, R. S., Sulha, Mustika, W., Putra, H., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Splitting tensile strength of fly ash-modified sand at various saturations and curing times. *Infrastructure,* 7(10), 126. https://doi.org/10.3390/infrastructures7100126.

58. Ibrahim, N. H., Iqbal, A., Noor, N. M., Roziawati, M. R., **Yanto, D. H. Y.,** Wilson, L. D., & Mahadi, A. H. (2022). A review of the biological, physical, and chemical mitigation of harmful algal blooms. *Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology*, 17(2), 95–110. https://doi.org/10.15578/squalen.633.

59. Andriani, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Comparative kinetic study on biodecolorization of synthetic dyes by *Bjerkandera adusta* SM46 in alginate beads-packed bioreactor system and shaking culture under saline-alkaline stress. *Biocatalysis and Biotransformation*, 40(4), 296–307. https://doi.org/10.1080/10242422.2021.1929193.

60. Bankeeree, W., Watanabe, T., Punnapayak, H., Lotrakul, P., Prasongsuk, S., Li, R., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Alkyl β-D-xyloside synthesis from black liquor xylan using *Aureobasidium pullulans* CBS 135684 β-xylosidases immobilized on spent expanded perlite. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(7), 2677–2686. https://doi.org/10.1007/s13399-020-00755-5.

61. Ibrahim, N. H., Iqbal, A., Noor, N. M., Razali, R. M., Sreekantan, S., **Yanto, D. H. Y.,** Mahadi, A. H., & Wilson, L.D. (2022). Photocatalytic remediation of harmful *Alexandrium minutum* bloom using hybrid chitosan-modified TiO2 films in seawater: A lab-based study. *Catalysts*, 12(7), 707. https://doi.org/10.3390/catal12070707.

62. Agung, S. A., **Yanto, D. H. Y.,** Meryandini, A., & Sunarti, T. C. (2022). Pretreated sugarcane bagasse result in more efficient degradation by *Streptomyces* sp s2. *Microbiology Indonesia*, 16(1), 13–22.

63. Sunardi, S., Istikowati, W. T., Sari, D. I., **Yanto, D. H. Y.,** & Kamari, A. (2022). Isolation of nanocellulose from aquatic wetland plant-*Eleocharis dulcis*. *Asian Journal of Chemistry*, 34(6), 1513–1516. https://doi.org/10.14233/ajchem.2022.23518.

64. Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C., Ramadhan, K. P., Anita, S. H., Okano, H., Watanabe, T., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Bioprospecting three newly isolated white-rot fungi from Berbak-Sembilang National Park, Indonesia for biodecolorization of anthraquinone and azo dyes. *Biodiversitas*, 23(2), 613–623. https://doi.org/10.13057/biodiv/d230201.

65. Anita, S. H., Ardiati, F. C., Ramadhan, K. P., Laksana, R. P. B., Sari, F. P., Nurhayat, O. D., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Decolorization of synthetic dyes by tropical fungi isolated from Taman Eden 100, Toba Samosir, North Sumatra, Indonesia. *Hayati Journal of Biosciences*, 29(4), 417–427. https://doi.org/10.4308/hjb.29.4.417-427.

66. Shittu, F. B., Iqbal, A., Ahmad, M. N., Yusop, M. R., Ibrahim, M. N. M., Sabar, S., Wilson, L. D., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Insight into the photodegradation mechanism of bisphenol-A by oxygen doped mesoporous carbon nitride under visible light irradiation and DFT calculations. *RSC Advances*, 12(17), 10409–10423. https://doi.org/10.1039/D2RA00995A.

67. Napitupulu, T. P., Kanti, A., Sulistiyani, T. R., **Yanto, D. H. Y.,** & Sudiana, I. M. (2022). Production of bacterial cellulose by *Komagataeibacter xylinus* InaCC B404 using different carbon sources. *Current Applied Science and Technology*, 22(4), 1–17. https://doi.org/10.55003/cast.2022.04.22.007.

68. Elma, M., Pratiwi, A. E., Rahma, A., Rampun, E. L. A., Mahmud, Abdi, C., Rosadi, R., **Yanto, D. H. Y.,** & Bilad, M. R. (2021).

Combination of coagulation, adsorption, and ultrafiltration processes for organic matter removal from peat water. *Sustainability*, 14(1), 370. https://doi.org/10.3390/su14010370.

69. Putra, H., Erizal, Sutoyo, Simatupang, M., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Improvement of organic soil shear strength through the calcite precipitation method using soybeans as a bio-catalyst. *Crystals*, 11(9), 1044. https://doi.org/10.3390/cryst11091044.
70. Elma, M., Sumardi, A., Paramita, A., Rahma, A., Lestari, A.E., **Yanto, D. H. Y.,** Hadi, S., Assyaifi, Z. L., & Sunardi, Raharjo, Y. (2021). Physicochemical properties of mesoporous organo-silica xerogels fabricated through organo catalyst. *Membranes*, 11(8), 607. https://doi.org/10.3390/membranes11080607.
71. **Yanto, D. H. Y.,** Guntoro, M. A., Nurhayat, O. D., Anita, S. H., Oktaviani, M., Ramadhan, K. P., Pradipta, M. F., & Watanabe, T. (2021). Biodegradation and biodetoxification of batik dye wastewater by laccase from *Trametes hirsuta* EDN 082 immobilised on light expanded clay aggregate. *3 Biotech*, 11(5), 247. https://doi.org/10.1007/s13205-021-02806-8.
72. Alam, R., Ardiati, F. C., Solihat, N. N., Alam, Md. B., Lee, S. H., **Yanto, D. H. Y.,** Watanabe, T., & Kim, S. (2021). Biodegradation and metabolic pathway of anthraquinone dyes by *Trametes hirsuta* D7 immobilized in light expanded clay aggregate and cytotoxicity assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124176. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124176.
73. Ramadhan, K. P., Anita, S. H., Oktaviani, M., Laksana, R. P. B., Sari, F. P., Nurhayat, O. D., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Biodecolorization of antraquinone and azo dyes by newly isolated Indonesian white-rot fungi. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, 13(1), 16–25. https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v13i1.26148.
74. Sumardi, A., Elma, M., Rampun, E. L. A., Lestari, A. E., Assyaifi, Z. L., Darmawan, A., **Yanto, D. H. Y.,** Syauqiah, I., Mawaddah, Y., & Wati, L. S. (2021). Designing a mesoporous hybrid organo-

silica thin film prepared from an organic catalyst. *Membrane Technology*, 2021(2), 5–8. https://doi.org/10.1016/S0958-2118(21)00029-X.

75. Wahyuni, W. T., Putra, B. R., Heryanto, R., Rohaeti, E., **Yanto, D. H. Y.,** & Fauzi, A. (2021). A simple approach to fabricate a screen-printed electrode and its application for uric acid detection. *International Journal of Electrochemical Science,* 16(2), 210221. https://doi.org/10.20964/2021.02.36.
76. Anita, S. H., Ardiati, F. C., Oktaviani, M., Sari, F. P., Nurhayat, O. D., Ramadhan, K. P., & **Yanto, D. H. Y.** (2020). Immobilization of laccase from *Trametes hirsuta* EDN 082 in light expanded clay aggregate for decolorization of Remazol Brilliant Blue R dye. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100602. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100602.
77. Andriani, A., Maharani, A., **Yanto, D. H. Y.,** Pratiwi, H., Astuti, D., Nuryana, I., Agustriana, E., Anita, S. H., Juanssilfero, A. B., Perwitasari, U., Pantouw, C. F., Nurhasanah, A. N., Windiastri, V. E., Nugroho, S., Widyajayantie, D., Sutiawan, J., Sulistyowati, Y., Rahmani, N., Ningrum, R. A., & Yopi. (2020). Sequential production of ligninolytic, xylanolytic, and cellulolytic enzymes by *Trametes hirsuta* AA-017 under different biomass of Indonesian sorghum accessions-induced cultures. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100562. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100562.
78. Anita, S. H., Sari, F. P., & **Yanto, D. H. Y.** (2019). Decolorization of synthetic dyes by ligninolytic enzymes from *Trametes hirsuta* D7. *Makara Journal of Science*, 23(1), 44–50. https://doi.org/10.7454/mss.v23i1.10803
79. Hidayat, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2018). Biodegradation and metabolic pathway of phenanthrene by a new tropical fungus, *Trametes hirsuta* D7. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2454–2460. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.051.

80. **Yanto, D. H. Y.,** Hidayat, A., & Tachibana, S. (2017). Periodical biostimulation with nutrient addition and bioaugmentation using mixed fungal cultures to maintain enzymatic oxidation during extended bioremediation of oily soil microcosms. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 116, 112–123. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.023.

81. **Yanto, D. H. Y.,** & Tachibana, S. (2014). Potential of fungal co-culturing for accelerated biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 278, 454–463. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.039.

82. **Yanto, D. H. Y.,** & Tachibana, S. (2014). Enhanced biodegradation of asphalt in the presence of Tween surfactants, Mn^{2+} and H_2O_2 by *Pestalotiopsis* sp. in liquid medium and soil. *Chemosphere*, 103, 105–113. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.044.

83. **Yanto, D. H. Y.,** Tachibana, S., & Itoh, K. (2014). Biodecolorization and biodegradation of textile dyes by the newly isolated saline-pH-tolerant fungus *Pestalotiopsis* sp. NG007. *Journal of Environmental Science and Technology*, 7(1), 44–55. https://doi.org/10.3923/jest.2014.44.55.

84. **Yanto, D. H. Y.,** & Tachibana, S. (2013). Biodegradation of petroleum hydrocarbons by a newly isolated *Pestalotiopsis* sp. NG007. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 438–450. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.09.008.

Jurnal Nasional

85. Radityani, F. A., Hariyadi, S., **Yanto, D. H. Y.,** Wulandari, A., Anita, S. H., & Ramadhani, A. (2026). Integrated treatment of catfish aquaculture wastewater using electrocoagulation and fungal-based bioreactor packed column (*Trametes hirsuta*). *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi,* 22(1), 95–104. https://dx.doi.org/10.62870/tjst.v22i1.37140.

86. Pattu, A. H. H., Charlena, C., **Yanto, D. H. Y.,** Suparto, I. H., & Oktaviani, M. (2025). Biodegradation of the ciprofloxacin

antibiotic by white rot fungus, *Trametes hirsuta* D7. Jurnal *Kimia Sains dan Aplikasi*, 27(12), 590–596. https://doi.org/10.14710/jksa.27.12.590-596.

87. Lestari,, P. Istikowati, W. T., Sunardi, S., **Yanto, D. H. Y.,** Fatriasari, W., & Ningrum, R. S. (2022). Analisis kandungan kimia kulit batang sagu (*Metroxylon sagu* Rottb.) sebagai bahan baku pulp dan kertas. *Jurnal Sylva Scienteae*, 5(2), 187–193. https://doi.org/10.20527/jss.v5i2.5371.
88. Arsyad, A., Istikowati, W. T., Sunardi, **Yanto, D. H. Y.,** Fatriasari, W., & Adi, D. S. (2021). Karakteristik anatomi kulit batang sagu (*Metroxylon sagu* Rottb) untuk bahan baku pulp dan kertas, *Jurnal Sylva Scienteae*, 4(6), 1021–1026. https://doi.org/10.20527/jss.v4i6.4577.
89. Oktaviani, M., Solihat, N. N., Amin, Y., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Produksi enzim ligninolitik dan aktivitas dekolorisasi pewarna sintesis oleh isolat baru jamur tropis *Cymatoderma dendriticum* WM01. *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 14(2), 278–289. https://doi.org/10.15408/kauniyah.v14i2.17184.
90. Anita, S. H., Ningsih, F., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Biodecolorization of Remazol Brilliant Blue R dye by tropical white-rot fungi and their enzymes in the presence of guaiacol. *Jurnal Riset Kimia*, 12(2), 94–101. https://doi.org/10.25077/jrk.v12i2.388.
91. Nurhayat, O. D., Putra, I. P., Anita, S. H., & **Yanto, D. H. Y.** (2021). Notes on some macro fungi from Taman Eden 100, Kawasan Toba, Sumatra Utara, Indonesia: Description and its potency. *Bioeduscience*, 5(1), 30–39. https://doi.org/10.22236/j.bes/515326.
92. Nurhayat, O. D., Anita, S. H., & **Yanto, D. H. Y.** (2020). Potensi cendawan pelapuk putih Indonesia sebagai agen biodekolorisasi limbah pewarna sintetik: artikel ulasan. *Jurnal Mikologi Indonesia*, 4(1), 156–167.

93. Radityani, F. A., Hariyadi, S., Suprihatin, **Yanto, D. H. Y.,** & Anita, S. H. (2020). Penerapan Teknik Elektrokoagulasi dalam Pengurangan Bahan Organik Air Limbah Kegiatan Perikanan. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 25(2), 283–290. https://doi.org/10.18343/jipi.25.2.284.

94. Sari, F. P., **Yanto, D. H. Y.,** & Pari, G. (2019). Activated carbon derived from OPEFB by one step steam activation and its application for dye adsorption: Kinetics and isothermal studies. *Reaktor*, 19(2), 67–75. https://doi.org/10.14710/reaktor.19.2.68-76.

95. Suyakto, Hermiati, E., **Yanto, D. H. Y.,** Fitria, Budiman, I., Ismadi, Masruchin, N., & Subiyanto, B. (2017). Proses pembuatan serat selulosa berukuran nano dari sisal (*Agave sisalana*) dan bamboo betung (*Dendrocalamus asper*). *Jurnal Selulosa*, 44(2), 57–65. https://doi.org/10.25269/JSEL.V44I02.133.

96. **Yanto, D. H. Y.,** & Tachibana, S. (2016). Utilization of kapok fiber as a natural sorbent in petroleum hydrocarbon biodegradation by *Pestalotiopsis* sp. *Journal of Lignocellulose Technology*, 1(1), 68–73.

97. Anita, S. H., Fajriutami, T., Ermawar, R. A., Fitria, **Yanto, D. H. Y.,** & Hermiati, E. (2011). Pretretment *Trametes versicolor* dan *Pleurotus ostreatus* pada bagas untuk produksi bioethanol. *Jurnal Teknologi Indonesia*, 34, 33–39.

98. Anita, S. H., **Yanto, D. H. Y.,** & Fatriasari, W. (2011). Pemanfaatan lignin hasil isolasi dari lindi hitam proses biopulping bambu betung (*Dendrocalamus asper*) sebagai media selektif jamur pelapuk putih. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 29(4), 312–321. https://doi.org/10.20886/jphh.2011.29.4.312-321.

99. Fatriasari, W., Ermawar, R. A., Falah, F., **Yanto, D. H. Y.,** Adi, D. T. N., Anita, S. H., & Hermiati, E. (2011). Kraft and soda pulping of white rot pretreated betung bamboo. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 9(1), 42–55. https://doi.org/10.51850/jitkt.v9i1.145.

100. Hermiati, E., **Yanto, D. H. Y.,** & Falah, F. (2009). Synthesis of aqueous polymer isocyanate for plywood adhesive. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 7(1), 39–47. https://doi.org/10.51850/jitkt.v7i1.241.

101. Subyato, Hermiati, E., **Yanto, D. H. Y.,** Fitria, Budiman, I., Ismadi, Masrcuhin, N., & Subiyanto, B. (2009). Proses pembuatan serat selulosa berukuran nano dari sisal (*Agave sisalana*) dan bamboo betung (*Dendrocalamus asper*). *Berita Selulosa*, 44(2), 57–65. https://doi.org/10.25269/JSEL.V44I02.133.

102. Fatriasari, W., Ermawar, R. A., Falah, F., **Yanto, D. H. Y.,** & Hermiati, E. (2009). Pulping soda panas terbuka bambu betung dengan praperlakuan fungi pelapuk putih (*Pleurotus ostreatus* dan *Trametes versicolor*). *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan*, 2(2), 45–50.

103. **Yanto, D. H. Y.,** & Hermiati, E. (2008). Campuran lateks karet alam–stirena dan poliisosianat sebagai perekat kayu lamina. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis,* 6(2), 63–68. https://doi.org/10.51850/jitkt.v6i2.246.

104. **Yanto, D. H. Y.,** Fatriasari, W., & Hermiati, E. (2006). Fortifikasi Deernol 33E dan PI-120 pada perekat lateks karet alam-stirena, *Jurnal Widya Riset*, 9, 49–54.

105. Ermawar, R. A., **Yanto, D. H. Y.,** Hermiati, E., & Fitria. (2006). Lignin degradation content in rice straw pre-treated by white-rot fungi. *Jurnal Widya Riset*, 9(3), 197–202.

Prosiding Seminar Internasional

106. Aini, F., Oktaviani, M., Listiyowati, S., **Yanto, D. H. Y.,** & Meryandini, A. (2025). Modulation of glucose oxidase activity in *Aspergillus niger* InaCC F539 by Pineapple Peel waste extract. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1550(1), 012011. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1550/1/012011.

107. Nurhayat, O. D., Chempaka, R. M., Anita, S. H., & **Yanto, D. H. Y.** (2025). Decolorization study of acid blue 25 using immobilized

Trametes hirsuta EDN082 in light expanded clay aggregate (LECA). In: Rahandi Lubis, M.A. (eds) *Proceedings of the 10th International Symposium for Sustainable Humanosphere*. ISSH 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, 255, 93–105. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1422-5_7.

108. Maulita, F., Meryandini, A., **Yanto, D. H. Y.,** Listiyowati, S., Oktaviani, M., & Nurhayat, O. D. (2025). Enzymatic degradation of oil palm empty fruit bunch fiber using laccase from *Trametes hirsuta* EDN 082. *AIP Conference Proceedings*, 3186(1), 020048. https://doi.org/10.1063/5.0234710.

109. Oktiarni, D., Hermansyah, Ibrahim, E., Marsi, Hasanudin, Miksusanti, **Yanto, D. H. Y.,** Rahmani, N., & Kasmiarti, G. (2024). Optimization of culture medium in the production of cellulolytic enzyme by *Klebsiella variicola* isolated from termite gut in Indralaya peatlands, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 3080(1), 040002. https://doi.org/10.1063/5.0199380.

110. Oktaviani, M., Damin, B. C. S., Rusdiarso, R., Masruchin, N., Suryanegara, L., & **Yanto, D. H. Y.** (2023). Decolorization of methylene blue dye by laccase and mycelia from *Trametes hirsuta* EDN 082 immobilized on alginate-nanocellulose beads. *AIP Conference Proceedings*, 2913(1), 020009. https://doi.org/10.1063/5.0171715.

111. Nurhayat, O. D., Putra, I. P., Sibero, M. T., Karimah, S. N., Anita, S. H., **Yanto, D. H. Y.,** & Kristanto, M. A. (2023). First identification of potential bioactive compounds from ethanol extracts of *Lepista sordida* from Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1271(1), 012058. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1271/1/012058.

112. Ardiati, F. C., **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Ramadhan, K. P., Laksana, R. P. B., Harsono, S. T., Panelin, Y., & Widiyatno. (2022). Application of myco-light expanded clay aggregate for real textile wastewater treatment in rotating drum biological contactor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental*

Science, 1017(2022), 012023. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1017/1/012023.

113. Anita, S. H., Ningsih, F., Mangunwardoyo, W., Hidayat, A., & **Yanto, D. H. Y.** (2022). Isolation, purification and characterization of laccase enzyme from *Trametes pavonia* EDN 134 for decolorization of azo dyes. *AIP Conference Proceedings*, 2391(1), 020022. https://doi.org/10.1063/5.0072628.
114. Huda, N., Rampun, E. L. A., Lestari, R. A., Raharjo, Y., **Yanto, D. H. Y.,** & Elma, M. (2021). Membrane pervaporation performance applied for brackish water prepared by vacuum impregnation method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1195(1), 012056. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1195/1/012056.
115. **Yanto, D. H. Y.,** & Hidayat, A. (2020). Biodegradation of buried crude oil in soil microcosm by fungal co-culture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1), 012084. https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012084.
116. Ningsih, F., **Yanto, D. H. Y.,** Mangunwardoyo, W., Anita, S. H., & Watanabe, T. (2020). Optimization of lacease production from a newly isolated *Trametes* sp. EDN134. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 572(1), 012024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/572/1/012024.
117. **Yanto, D.H.Y.,** Auliana, N., Anita, S.H., & Watanabe, T. (2019) Decolorization of synthetic dyes by laccase from newly isolated *Trametes hirsuta* EDN084 mediated by violuric acid. IOP Conference Proceedings: Earth and Environmental Science 374(1):012005. http://doi.org/10.1088/1755-1315/374/1/012005.
118. Ardiati, F. C., **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., & Watanabe, T. (2019). Immobilization of *Trametes hirsuta* D7 in light expanded clay aggregate for decolorization of synthetic dye. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 308(1), 012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/308/1/012002.

119. **Yanto, D. H. Y.,** Krishanti, N. P. R. A., Ardiati, F. C., Anita, S. H., Nugraha, I. K., Sari, F. P., Laksana, R. P. B., Sapardi, S., & Watanabe, T. (2019). Biodegradation of styrofoam waste by ligninolytic fungi and bacteria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 308(1), 012001. https://doi.org/10.1088/1755-1315/308/1/012001.

120. **Yanto, D. H. Y.,** Zahara, S., Laksana, R. P. B., Anita, S. H., Oktaviani, M., & Sari, F. P. (2017). Development of PVA-alginate as a matrix for enzymatic decolorization of textile dye in bioreactor system. AIP Conference Proceedings, 1803(1), 020062. https://doi.org/10.1063/1.4973189.

121. Oktaviani, M., & **Yanto, D. H. Y.** (2016). Biodecolorization of textile dye by isolated tropical fungi. *Proceedings of International Conference of Indonesian Forestry Researchers III-2015*, Bogor, 21-22 October 2015, 276–285.

122. **Yanto, D. H. Y.,** & Tachibana, S. (2015). Double layer immobilized managenese peroxidase from *Pleurotus ostreatus* effectively enhanced the biodecolorization of remazol brilliant blue R dye. *Proceedings of International Conference of Indonesian Forestry Researchers III-2015*, Bogor, 21-22 October 2015, 269–275.

123. Fitria, **Yanto, D.H.Y.,** Anita, S.H., Risanto, L., Solihat, N.N., & Sari, F.P. (2015). Influence of solid loading on physical changes and hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber pretreated by microwave and oxalic acid. 2nd International Symposium on Innovative Bio-Production Indonesia. Bogor, September 17th, 2015, 40–44.

124. **Yanto, D.H.Y.,** Tachibana, S., & Itoh, K. (2014). Biodecolorization of textile dyes by immobilized enzymes in a vertical bioreactor system. Procedia Environmental Sciences, 20, 235–244.

125. Ermawar, R. A., Fitria, Fatriasari, W., Fajriutami, T., **Yanto, D. H. Y.,** & Hermiati, E. (2012). Biopulping of bamboo using white-rot fungi *Schizophyllum commune*. Proceedings of the

2nd International Symposium for Sustainable Humanosphere, Bandung, Indonesia.

Prosiding Seminar Nasional

126. Sari, F. P., Tahar, M., Mardiyanti, R., Oktaviani, M., Anita, S. H., Laksana, R. P. B., & **Yanto, D. H. Y.** (2018). Enzim ligninolitik sebagai agen biodekolorisasi dari jamur pelapuk putih dengan biomassa lignonselulosa sebagai media tumbuh. *Prosiding Seminar Lignoselulosa 18*, 120–126. Cibinong, 19 September 2018.
127. Anita, S. H., Annisa, T., Oktaviani, M., Sari, F. P., Laksana, R. P. B., & **Yanto, D. H. Y.** (2018). Biodekolorisasi pewarna tekstil antrakuinon menggunakan isolate jamur tropis Indonesia. *Prosiding Seminar Lignoselulosa 2018*, 148–154. Cibinong, 19 September 2018.
128. Fatriasari, W., Ermawar, R. A., Falah, F., **Yanto, D. H. Y.,** Nugroho, D. T. A., & Hermiati, E. (2009). Biopulping bamboo betung menggunakan fungi putih (*Pleurotus ostreatus* dan *Trametes versicolor*) dengan proses kraft dan soda. *12th Indonesian Wood Research Society National Seminar*, Bandung, 23–25.
129. Daud, M., **Yanto, D. H. Y.,** & Massijaya, M. Y. (2007). Pengaruh rasio perekat urea-formaldehida (UF) dan isosianat terhadap kadar emisi formaldehida kayu lapis sengon (*Paraserianthes falcataria*). *Prosiding Seminar Nasional MAPEKI X*, Pontianak, Kalimantan Barat, 9-11 Agustus 2007. 1–7.
130. Fatriasari, W., Falah, F., **Yanto, D. H. Y.,** & Hermiati, E. (2007). Optimasi proses pemasakan soda terbuka dan penggilingan pulp bambu betung dan bambu kuning. *Prosiding Seminar Nasional MAPEKI X*, Pontianak, Kalimantan Barat, 9-11 Agustus 2007. 560–567.

Kekayaan Intelektual

Paten Internasional

Terdaftar

131. Subyakto, Subiyanto, B., Hermiati, E., **Yanto, D. H. Y.,** Fitria, Prasetyo, K. W., Budiman, I., Ismadi, Kurniawan, W., Inoue, T. (2009). Composite of kenaf microfiber with polypropylene and polylactic acid. Paten Terdaftar. World Intellectual Property Organization No. WO/2009/139508 A1, 19 November 2009.
132. Tachibana, S., **Yanto, D. H. Y.**, Sari, A. A. (2013). Azo dye-degrading agents containing crude enzymes derived from *Trametes versicolor* or *Pestalotiopsis* and azo dye-degrading apparatus. Paten Terdaftar. Japan Paten No. JP 2013-18313 A, 19 September 2013.
133. Tachibana, S., **Yanto, D. H. Y.** (2014). Petroleum-contaminated soil treatment agents containing *Pestalotiopsis* NG007. Paten Terdaftar. Japan Patent No. JP 2014-088548 A, 15 Mei 2014.

Paten Nasional

Terdaftar

134. **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Ardiati, F. C., Ramadhan K. P., Sari, F. P., Nurhayat, O. D., Darmawan, T., Laksana, R. P. B., Jayati, 2019. Hidroton terimobilisasi jamur pelapuk putih, proses pembuatan dan penggunaannya untuk penjernih warna limbah tekstil. Paten Terdaftar, No. P00201910056, 6 November 2019.
135. **Yanto, D. H. Y.,** Oktaviani, M., Anita, S. H., Ramadhan, K. P., Nurhayat, O. D. (2020). Proses pembuatan hidroton terimobilisasi enzim lakase dan penggunaannya untuk dekolorisasi limbah pewarna sintesis. *Paten Terdaftar*, No. P00202008337, 6 November 2020.
136. Sunardi, Istikowati, W. T., Sutiya, B., **Yanto, D. H. Y.** (2021). Formulasi enkapsulasi minyak mimba menggunakan komposit

alginat-nanoselulosa dari pelepah nipah. *Paten Terdaftar*, No. S00202104919, 27 Juni 2021.

137. **Yanto, D. H. Y.,** Oktaviani, M, Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C., Zulfiana, D. (2022). Proses pembuatan hydrogel dari kalsium alginate-nanoselulosa-enzim lakase dan komposisi produk yang dihasilkannya sebagai penghilang warna sintetis. *Paten Terdaftar*, No. P00202203748. 28 Maret 2022.

138. Anita, S. H., **Yanto, D. H. Y.,** Zulfiana, D., Oktaviani, M., Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C. (2022). Formulasi dan proses pembuatan gel penyanitasi tangan tanpa alkohol berbahan aktif enzim lakase. *Paten Terdaftar*, No. P00202215592. 27 Desember 2022

139. Ningrum, R. S., Kusumah, S. S., Sudarmanto, **Yanto, D. H. Y.,** Rodhibilah, F. I., Safitri, R. (2022). Biofoam miselia jamur *Rhizopus oligosporus* dan proses pembuatannya. *Paten Terdaftar*, No. P00202215762. 29 Desember 2022.

140. Oktaviani, M., **Yanto, D. H. Y.,** Zulfiana, D. (2023). Metode produksi enzim amiloglukosidase dari kapang *Aspergillus niger* menggunakan substrat limbah buah-buahan. *Paten Terdaftar*, No. P00202315108, 30 Desember 2023.

141. **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Ardiati, F. C., Nurhayat, O. D., Zulfiana, D. (2023). Metode degradasi antibiotik kloramfenikol menggunakan jamur pelapuk putih. *Paten Terdaftar*, No. P00202314810, 27 Desember 2023.

142. **Yanto, D. H. Y.,** Zulfiana, D., Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Oktaviani, M., Ardiati, F. C., Saskiawan, I., Nugroho, A. R., Ajidarma, E., Bentangan, A. (2023). Metode penapisan jamur pelapuk putih untuk menghasilkan miselium lembaran. Paten Terdaftar, No. P00202314846, 28 Desember 2023.

143. **Yanto, D. H. Y.,** Nurhayat, O. D., Ardiati, F. C., Oktaviani, M., Anita, S. H. (2024). Formulasi dan proses pembuatan *halloysite nanotube* terimobilisasi enzim lakase serta penggunaannya

untuk dekolorisasi limbah pewarna tekstil. *Paten Terdaftar*, No. P00202415770, 19 Desember 2024.

144. **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Oktaviani, M., Zulfiana, D., Sari, R. I. P. (2024). Formula media produksi enzim lakase menggunakan jamur pelapuk putih *Trametes hirsuta* EDN 082 dengan sistem fermentasi terendam dan proses produksinya. Paten Terdaftar, P00202414560, 6 Desember 2024.

145. **Yanto, D. H. Y.,** Ardiati, F. C., Nurhayat, O. D., Anita, S. H., Oktaviani, M., Zulfiana, D. (2024). Proses pembuatan biocarrier terimobilisasi jamur pelapuk putih dan produk yang dihasilkannya. *Paten Terdaftar*, No. P00202407254, 31 Juli 2024.

146. Munifah, I**., Yanto, D.H.Y.,** Yetti, E., Kusumawati, R., Basmal, J., Nurhayati, Kurniati, T.H., Tashara, S. (2025). Formula dan proses pembuatan biofilm selulosa bakteri *Komagataeibacter xylinus* B417 InaCC berbasis rumput laut *Gracillaria* sp. Paten Terdaftar, No. P00202514011, 9 Desember 2025

147. Sari, R. I. P., Shah, S. T., Nurhayat, O. D., Septisetyani, E. P., Anita, S. H., Zulfiana, D., Oktaviani, M., **Yanto, D. H. Y.** (2025). Metode biosintesis nanopartikel seng oksida (ZnO) menggunakan supernatant bakteri *Bacillus cereus* KRC724. Paten Terdaftar, No. P00202507137, 29 Juli 2025.

148. **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Nurhayat, O. D., Oktaviani, M., Diansari, A., Karimah, S. N. (2026). Formula pasta gigi berbahan aktif lakase dari jamur pelapuk putih *Trametes hirsuta* EDN 082. Paten Terdaftar, No. P00202604852, 18 Mei 2026.

Tersertifikasi

149. **Yanto, D. H. Y.,** Oktaviani, M., Anita, S. H., Laksana, R. P. B., Sari, F. P., Fajriutami, T. (2021). Formulasi agen dekolorisasi limbah tekstil, proses pembuatan dan penggunaannya. Paten Tersertifikasi. IDP000078644, 25 Agustus 2021.

150. Subyakto, Hermiati, E., **Yanto, D. H. Y.,** Fitria, Budiman, I., Ismadi, Masruchin, N., Subiyanto, B. (2017). Proses pembuatan

serat alam berukuran nano dari serat bambu untuk bahan penguat polimer. Paten Tersertifikasi. IDP000044131, 20 Januari 2017.

151. Darmayati, Y., **Yanto, D. H. Y.,** Sutiknowati, L. I., Hatmanti, A., Afianti, N. F., De Fretes, C. E. 2022. Formulasi pendegradasi minyak berbahan dasar bakteri dan mineral. Paten Terserfikasi. IDP000081822, 23 Juni 2022.

152. Sunardi, Istikowati, W. T., Elma, M., **Yanto, D. H. Y.,** Sutiya, B., Kamari, A. (2022). Produksi suspense nano selulosa dari limbah pelepah nipah (*Nypa fruticans*). Paten Tersertifikasi. IDS000005241. 21 November 2022.

153. Suryanegara, L., Saepulloh, Ismadi, Subyakto, Yusuf, S., Rochman, N. T., **Yanto, D. H. Y.,** Gopar, M. (2024). Boiler berbahan bakar pelet biomassa. Paten Tersertifikasi, IDS000007353, 5 Februari 2024.

154. **Yanto, D. H. Y.,** Anita, S. H., Oktaviani, M. 2025. Metode produksi enzim lakase dari jamur pelapuk putih *Trametes hirsuta* EDN 082 dan *Trametes pavonia* EDN 134 menggunakan substrat biomassa lignoselulosa. *Paten Tersertifikasi*, IDP000097929, 3 Maret 2025.

155. **Yanto, D. H. Y.,** Watanabe, T., Punnapayak, H., Prasongsuk, S., Bankeeree, W., Anita, S. H., Oktaviani, M., Sari, F. P., Laksana, R. P. B. (2025). Formulasi pengaktivasi perlite dan penggunaan perlite teraktivasi enzim untuk penghilang warna limbah tekstil. *Paten Tersertifikasi*, IDP000102871, 23 Desember 2025.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. DATA PRIBADI

Nama	:	Dr. Dede Heri Yuli Yanto, S.Si., M.Agr.
Tempat, Tanggal Lahir	:	Jakarta, 10 Juli 1981
Anak ke	:	2 dari 4 bersaudara
Jenis Kelamin	:	Laki-Laki
Nama Ayah Kandung	:	Achmad Muhasar
Nama Ibu Kandung	:	Sundari
Nama Istri	:	Nurul Aqidah, S.Si.
Jumlah Anak	:	4
Nama Anak	:	1. Nursyifa Naftakalia 2. Muhammad Alqowy Alfatih 3. Muhammad Sayyid Arroyah 4. Muhammad Syaddad Alliwa
Nama Unit	:	Pusat Riset Mikrobiologi Terapan
Nama Organisasi	:	Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan
Nama Instansi	:	Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	:	Inovasi Enzim Lakase Berbasis Biodiversitas Indonesia sebagai Solusi Strategis untuk Bioremediasi
Ilmu	:	Hayati
Bidang	:	Mikrobiologi Terapan
Kepakaran	:	Bioproses dan Bioremediasi
No. SK Pangkat Terakhir	:	Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 17/K Tahun 2024 tanggal 5 Agustus 2024.
No. SK Peneliti Ahli Utama	:	Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 46/M Tahun 2021 tanggal 18 Oktober 2021

Tautan Scopus	:	https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55909235000
Tautan Google Scholar	:	https://scholar.google.co.id/citations?hl=id&user=S3PF5VsAAAAJ

B. PENDIDIKAN FORMAL

No	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	SDN 11 Pagi	Jakarta/ Indonesia	1993
2.	SMP	SMPN 100	Jakarta/ Indonesia	1996
3.	SMA	SMAN 33	Jakarta/ Indonesia	1999
4.	S1	IPB University	Bogor/ Indonesia	2004
5.	S2	Ehime University	Matsuyama/ Jepang	2011
6.	S3	Ehime University	Matsuyama/ Jepang	2014

C. Pendidikan Nonformal

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Diklat Fungsional Peneliti Pertama	Bogor/Indonesia	2006
2.	Diklat Metodologi Penelitian	Cisarua/Indonesia	2008
3.	Pelatihan Penulisan Proposal dan Bisnis Plan	Pusat Penelitian Biomaterial/ Cibinong/Indonesia	2015

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
4.	Pelatihan "Introduction of Life Cycle Assesment (LCA)	Pusat Penelitian Kimia/Serpong/ Indonesia	2015
5.	Humanosphere Science School	Jakarta, Indonesia	2015
6.	Workshop Penulisan Paten	Bogor, Indonesia	2015
7.	Research Exchange on Japan ASEAN Science, Technology and Innovation Platfrom Network	Kyoto University/ Uji, Kyoto, Jepang	2016
8.	Diklat Jabatan Fungsional Peneliti Tingkat Lanjutan (Predikat Sangat Baik)	Pusbindiklat Peneliti, Bogor, Indonesia	2016
9.	Workshop of Bioresource and Biodiversity Research	Kyoto University/ Kyoo, Jepang	2016
10.	Research Exchange on Japan ASEAN Science, Technology and Innovation Platfrom Network	Kyoto University/ Uji, Kyoto, Jepang	2017
11.	Research Exchange on Japan ASEAN Science, Technology and Innovation Platfrom Network	Kyoto University/ Uji, Kyoto, Jepang	2018

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
12.	Research Exchange on Japan ASEAN Science, Technology and Innovation Platfrom Network	University Sains Malaysia	2019
13.	Training on Chromatography & Mass Spectrometry	Singapore	2019
43.	Research Exchange on Japan ASEAN Science, Technology and Innovation Platfrom Network	Kyoto University/ Uji, Kyoto, Jepang	2020
15.	Krios G4 Cryo TEM Course Advance, Tundra and FIB Aquilos 2 - Small DualBeam Course Advance	Thermo Fisher Scientific's NanoPort, Belanda	2023
16.	South and Southeast Asian Young Talents China's Science Technology and Innovation Trip	Kunming dan Shanghai/China	2023
17.	Research Exchange on Japan ASEAN Science, Technology and Innovation Platfrom Network	Kyoto University/ Uji, Kyoto, Jepang	2024

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
18.	Indonesia – US Bilateral Digital Technology Dialogue Ke - 2	Texas, Amerika Serikat	2024
19.	Research Exchange on Japan ASEAN Science, Technology and Innovation Platfrom Network	Kyoto University/ Uji, Kyoto, Jepang	2025
20.	Structural Biology Course, NAIST Bio Research Exchange Program	Nara Institute of Science and Technology/ Jepang	2025

D. JABATAN STRUKTURAL

No	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	Kepala Bidang Pengelolaan dan Diseminasi Hasil Penelitian	Pusat Penelitian Biomaterial - LIPI	2016 – 2018
2.	Plt. Kepala Pusat Penelitian Biomaterial	LIPI	2018 – 2019

E. JABATAN FUNGSIONAL

No	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Peneliti Ahli Muda	1 April 2015
2.	Peneliti Ahli Madya	1 Juli 2017
3.	Peneliti Ahli Utama	30 Oktober 2021

F. PENUGASAN KHUSUS NASIONAL/ INTERNASIONAL

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	Instruktur Pekan Ilmiah Remaja Daerah Kabupaten Jombang	LIPI	2016
2.	Narasumber / Bimbingan Teknis Penyusunan KTI Jabatang Fungsional di Lingkungan Kementrian PUPR	PUPR	2016
3.	Mentor/Lomba Ilmiah Remaja Nasional	LIPI	2016
	Ketua/Pusat Unggulan Iptek Lignoselulosa	Kepala Pusat Biomaterial - LIPI	2016 - 2019
4.	Dewan Juri Olimpiade Sains Tarakanita Nasional (OSTARNAS) III	Yayasan Tarakanita	2017
5.	Instrukstur/Pekan Ilmiah Remaja Nasional XVI, Aceh	LIPI	2017
6.	Dewan Juri/Lomba Karya Ilmiah Remaja se- Yadika dan Pamor	Yayasan Abdi Karya	2018
7.	Instruktur/Pelatihan Publikasi Ilmiah di Jurnal Global Bereputasi Internasional	LIPI	2018
8.	Mentor/Lomba Ilmiah Remaja Nasional	LIPI	2018
9.	Instruktur/Pekan Ilmiah Remaja Daerah, Merauke	LIPI	2018
10.	Instruktur/Pekan Ilmiah Remaja Daerah, Cilacap	LIPI	2018
11.	Dewan Juri/Lomba Karya Ilmiah Remaja Nasional Ke-51	LIPI	2019

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
12.	Dewan Juri/Lomba Karya Ilmiah Remaja Nasional Ke-52	LIPI	2020
13.	Narasumber/Pelatihan KTI Internasional Terindeks Global Baristand, Palembang	LIPI	2020
14.	Narasumber/Diskusi Pengelolaan Lingkungan di Kota Pekalongan	Cabang Dinas Kehiutanan Wilayah IV, Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Provinsi Jawa Tengah	2020
15.	Narasumber/Workshop Publikasi Ilmiah di Jurnal Internasional Bereputasi Menengan dan Tinggi di Institut Teknologi Batam (ITEBA) dan Batam Tourism Politeknik (BTP)	Kepala Pusat Pembinaan, Pendidikan dan Pelatihan LIPI	2020
16.	Narasumber/Kegiatan Kuliah Umum Perkembangan Riset Kimia Material Berbasis Biomassa di Indonesia	Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya	2020
17.	Narasumber/Workshop Online Publikasi Ilmiah di Jurnal Internasional Bereputasi Menengah dan Tinggi, Diseminasi Kemitraan LIPI dengan Komisi VII DPR RI	Sekretaris Utama LIPI	2020

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
18.	Narasumber/Workshop Publikasi Ilmiah di Jurnal Internasional Bereputasi Menengan dan Tinggi di Banjarmasin	Kepala Pusat Pembinaan, Pendidikan dan Pelatihan LIPI	2020
19.	Narasumber/Pelatihan Karya Tulis Ilmiah UNNES	Wakil Rektor Bidang Kemahasiswaan Universitas Negeri Semarang	2020
20.	Dewan Juri/Lomba Karya Ilmiah Remaja Nasional Ke-53	BRIN	2021
21.	Narasumber/Kuliah Umum Biomaterial untuk Bioremediasi Lingkungan	Dekan Fakultas Perikanan dan Biologi Universitas Bangka Belitung	2021
22.	Dewan Juri Bukit Asam Innovation Award 4.0	PT Bukit Asam	2021
23.	Narasumber/Stadium Generale Biologi ITERA: Bioprospeksi Kekayaan Hayati untuk Produk Terstandardisasi	ITERA	2021
24.	Narasumber/ Physics Talks, Dept of Physics, IPB University	IPB	2021
25.	Narasumber / Virtual Summer School, Green-Sustainable Chemistry for A Better Future	UPI	2021

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
26.	Narasumber/Pelatihan Publikasi Ilmiah di Jurnal Internasional Bereputasi Menengah dan Tinggi di Tarakan, Kalimantan Utara	Deputi Bidang Penguatan Inovasi	2021
27.	Narasumber/Kuliah Umum Mikoteknik, Mikrobiologi, IPB University	IPB	2021
28.	Narasumber/Pelatihan Penyusunan Proposal Penelitian untuk Mahasiswa di Kabupaten Maros	Deputi Bidang Pemanfaatan Riset dan Inovasi	2021
29.	Instrukstur/Pekan Ilmiah Remaja Nasional XXI, Lombok	BRIN	2022
30.	Dewan Juri/Lomba Karya Ilmiah Remaja Nasional Ke-54	BRIN	2022
31.	Instruktur/Pelatihan Pembuatan Jurnal Internasional di Palangkaraya	Direktur Pemanfaatan Riset dan Inovasi pada Kementerian/ Lembaga, Masyarakat, dan Usaha Mikro, Kecil dan Menengah	2022
32.	Dewan Juri / Kolabpreneur 2022	BRIN	2022
33.	Narasumber/Pelatihan Penyusunan KTI bagi Dosen dan Mahasiswa Kabupaten Banymas	Deputi Bidang Pemanfaatan Riset dan Inovasi BRIN	2022

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
34.	Narasumber /Bimbingan Teknis Penyusunan Karya Tulis Ilmiah (KTI) untuk Guru SLTA dan Sederajat di Kabupaten Bandung dan Kabupaten Bandung Barat	Deputi Bidang Pemanfaatan Riset dan Inovasi BRIN	2022
35.	Dewan Juri International Research and Innovation Fair IRIF 2023	BRIN	2023
36.	Dewan Juri International Research and Innovation Fair IRIF 2024	BRIN	2024
37.	Dewan Juri International Research and Innovation Fair IRIF 2025	BRIN	2025
38.	Dewan Juri Olimpiade Sains Tarakanita Nasional (OSTARNAS) 2025	Yayasan Tarakanita	2025

G. KEIKUTSERTAAN DALAM KEGIATAN ILMIAH

No	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	The 5th Indonesia Biotechnology Conference, An International Forum "Green Industrial Innovation through Biotechnology"	Speaker	Lombok, Indonesia	2012
2.	Joint Seminar on Agriculturan Science	Participant	Ozu, Jepang	2012

No	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
3.	The 5th Lignin Symposium	Speaker	Fukuoka, Jepang	2012
4.	The 12th Science Council of Asia Conference and International Symposium	Speaker	Bogor, Indonesia	2012
5.	The 4th International Conference on Sustainable Future for Human Security	Speaker	Kyoto, Jepang	2013
6.	The 2015 Indonesian – American Kavli Frontiers of Science Symposium	Speaker	Makasar, Indonesia	2015
7.	The 3rd International Conference of Indonesia Forestry Researchers 2015	Speaker	Bogor, Indonesia	2015
8.	The 7th International Symposium of Indonesian Wood Research Society (IWORS)	Speaker, Chairman	Bandung, Indonesia	2015
9.	The 8th International Symposium of Indonesian Wood Research Society (IWORS	Speaker	Ambon, Indonesia	2016

No	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
10.	RISH International Seminar on Chemistry and Biotechnology for Lignocellulose	Speaker	Kyoto, Jepang	2016
11.	The 6th International Symposium on Sustainable Humanosphere	Speaker	Bogor, Indonesia	2016
12.	International Premeeting of Humanosphere Asia Research Node on Biomass Utilization	Speaker	Kyoto, Jepang	2016
13.	Seminar Nasional Lignoselulosa	Speaker	Bogor, Indonesia	2016
14.	Seminar Nasional Lignoselulosa	Scientific Committee	Bogor, Indonesia	2016, 2017, 2018, 2019
15.	The 2nd International Symposium on Applied Chemistry	Speaker	Serpong, Indonesia	2016
16.	International Conference on National Product and Bioresource Science	Scientific Committee	Bogor, Indonesia	2017

No	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
17.	International Symposium on Humanosphere Science	Scientific Committee	Bandung, Medan, Bogor Indonesia	2017, 2018, 2019
18.	Third Japan-ASEAN Science Technology and Innovation Platform	Speaker	Bangkok, Indonesia	2017
19.	The 2nd International Symposium on Science	Speaker	Bogor, Indonesia	2017
20.	The 1st International conference 2017, on Advanced Technology in Waste Water and Waste Management for Extractive Industries	Speaker	Bali, Indonesia	2017
21.	The 5th JASTIP Joint Symposium: Disaster Risk Reduction & Environmental Sustainability for Social Resilience	Speaker	Kuala Lumpur, Malaysia	2018
22.	The 8th International Symposium on Sustainable Humanosphere	Invited Speaker	Medan, Indonesia	2018

No	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
23.	The 1st International Symposium on Bioremediation, Biomaterials, Revegetation, and Conservation	Speaker	Bogor, Indonesia	2018
24.	The 2018 International Conference on Biosphere Reserve	Speaker	Palembang, Indonesia	2018
25.	The 1st International Symposium on Bioremediation, Biomaterials, Revegetation, and Conservation	Scientific Committee	Bogor, Indonesia	2018
26.	The 14th Humanosphere Science School and The 9th International Symposium on Sustainable Humanosphere	Invited Speaker	Bogor, Indonesia	2019
27.	International Conference on Science and Technology for Sustainable Industry (ICSTSI)	Scientific Committee	Banjarbaru, Indonesia	2020

No	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
28.	The 3rd Water Energy Nexus Conference (WEN), Springer	Scientific Committee	Tunisia	2020
29.	International Webinar on Indonesian Biodiversity	Speaker	Bogor, Indonesia	2020
30.	Physics Talks, Dept of Physics, IPB University	Speaker	Bogor, Indonesia	2021
31.	Virtual Summer School, Green-Sustainable Chemistry for A Better Future	Speaker	Bandung, Indonesia	2022
32.	The 8th Gruber-Sudigdo Lecture 2025	Keynote Speaker	Bandung, Indonesia	2025
33.	International Conference on Biochemistry 2026 (ICB2026)	Keynote Speaker	UPM, Malaysia	2026
34.	The 10th International Conference for Young Chemists (ICYC 2026)	Keynote Speaker	USM, Malaysia	2026

H. KETERLIBATAN DALAM PENGELOLAAN JURNAL ILMIAH

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1.	Jurnal of Lignocellulose Technology	Pusat Penelitian Biomaterial - LIPI	Editor-In-Chief	2016–2018
2.	Journal of Natural Resources and Environmental Management	IPB	Editor	2019
3.	Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers	Elsevier	Reviewer	2014
4.	International Biodeterioration & Biodegradation	Elsevier	Reviewer	2016 - 2018
5.	Journal of Hazardous Materials	Elsevier	Reviewer	2017–2020
6.	Journal of Environmental Chemical Engineering	Elsevier	Reviewer	2019
7.	Energy & Fuels	Elsevier	Reviewer	2019
8.	Environmental Tehcnology and Innovation	Elsevier	Reviewer	2020
9.	Chemosphere	Elsevier	Reviewer	2020

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
10.	Bioresource Technology Reports	Elsevier	Reviewer	2020
11.	Exotoxicology and Environmental Safety	Elsevier	Reviewer	2020 - 2021
12.	Biocatalysis and Biotransformation	Taylor & Francis	Reviewer	2021

I. CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

1. Karya Tulis Ilmiah
   a) Kualifikasi Karya

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
3.	Bagian dari Buku Internasional	2
5.	Jurnal Internasional	82
6.	Jurnal Nasional	21
7.	Prosiding Internasional	20
8.	Prosiding Nasional	5
9.	Paten Internasional	3
	Terdaftar	3
	Tersertifikasi	
10.	Paten Nasional	22
	Terdaftar	15
	Tersertifikasi	7
11.	Perlindungan Varietas Tanaman (PVT)	
12.	Rumpun atau Galur Hewan/Ikan/Benih Unggul Tanaman Hutan	
13.	Hak Cipta	
14.	Desain Industri	

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
15.	Desain dan Tata Letak Sirkuit Terpadu	
16.	Transaksi Lisensi	

b) Kualifikasi Penulis

No	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	-
2.	Bersama Penulis Lainnya	130
	Total	130

c) Kualifikasi Bahasa

No	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	17
2.	Bahasa Inggris	113
3	Bahasa Lainnya	-
	Total	130

2. Kekayaan Intelektual

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Paten Internasional	3
	Terdaftar	3
	Tersertifikasi	
2.	Paten Nasional	22
	Terdaftar	15
	Tersertifikasi	7
3.	Perlindungan Varietas Tanaman (PVT)	-
4.	Rumpun atau Galur Hewan/Ikan/Benih Unggul Tanaman Hutan	-
5.	Hak Cipta	-
6.	Desain Industri	-
7.	Desain dan Tata Letak Sirkuit Terpadu	-

3. Kerjasama bersama Mitra

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Transaksi Lisensi	-

J. PEMBINAAN KADER ILMIAH

Pejabat Fungsional Peneliti atau Perekayasa

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Fahriya Puspita Sari	LIPI	Mentor Penelitian	2018, 2019
2.	Fenny Clara Ardiati	LIPI	Mentor Penelitian	2019
3.	Irma Melati	BRIN	Mentor Penelitian dan Penguji Eksternal S3	2023
4.	Sita Heris Anita	BRIN	Pembimbing S3	2025
5.	Maulida Oktaviani	BRIN	Pembimbing S3	2025
6.	Deni Zulfiana	BRIN	Pembimbing S3	2025
7.	Dian Andriani	BRIN	Pembimbing S3	2024
8.	Dian Japany Puspitasari	BRIN	Penguji Eksternal S3	2025
9.	Kharisma Panji Ramadhan	BRIN	Pembimbing S2	2023

Mahasiswa

No	Nama	Perguruan Tinggi/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
1.	Cyntia Dewi Rahmawati	IPB University	Pembimbing S1	2018
2.	Dwi Sriyani	IPB University	Pembimbing S1	2018

No	Nama	Perguruan Tinggi/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
3.	Indra Kusuma Nugraha	IPB University	Pembimbing S1	2018
4.	Fitri Afina Radityani	IPB University	Pembimbing S2	2019
5.	Nurul Aini	IPB University	Pembimbing S1	2019
6.	Ike Apriani	Universitas Sriwijaya	Pembimbing S3	2020
7.	Fitria Ningsih	Universitas Indonesia	Pembimbing S2	2020
8.	Silviyani Nurul Karimah	IPB University	Pembimbing S2	2020
9.	Muhammad Zalkifal	IPB University	Pembimbing S2	2020
10.	Fitria Maulita	IPB University	Pembimbing S2	2020
11.	Nur Byasih	Universitas Lambung Mangkurat	Pembimbing S1	2020
12.	Norhasanah	Universitas Lambung Mangkurat	Pembimbing S1	2020
13.	Maria Andriani Guntoro	Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S1	2020
14.	Rafiqul Alam	Kyungpook National University, Republic of Korea	Pembimbing S2 dan S3	2021

No	Nama	Perguruan Tinggi/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
15.	Ananda Novita Hi.Pattu	IPB University	Pembimbing S2	2022
16.	Inda Hastuti N Naser	IPB University	Pembimbing S2	2022
17.	Dian Andriani	Universiti Teknologi Malaysia	Pembimbing S3	2022
18.	Dwita Oktiarni	Universitas Sriwijaya	Pembimbing lab S3	2022
19.	Rizky Mutiara Adithama	IPB University	Penguji Eksternal S2	2022
20.	Sunu Pertiwi	Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S2	2022
21.	Riska Kurniawati	Universitas Padjadjaran	Pembimbing S1	2022
22.	Titis Ayuningtyas Dyah Kusumarini	IPB University	Pembimbing S2	2022
23.	Regita Reynata	Universitas Brawijaya	Pembimbing S2	2023
24.	Phoon Seow Ching	Universiti Sains Malaysia	Pembimbing S2	2023
25.	Fitratul Aini	IPB University	Pembimbing S3	2023
26.	Ervina Mukharomah	Universitas Sriwijaya	Pembimbing S3	2024
27.	Stefani Christina Wahyudi	Institut Teknologi Bandung	Pembimbing S2	2025

No	Nama	Perguruan Tinggi/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
28.	Silviyani Nurul Karimah	Institut Teknologi Bandung	Pembimbing S3	2025
29.	Regita Reynata	Institut Teknologi Bandung	Pembimbing S3	2025
30.	Indah Puji Lestari	Chulalongkorn University, Thailand	Penguji Eksternal S2	2025
31.	Titan Dwikama Putra	Chulalongkorn University, Thailand	Penguji Eksternal S2	2026
32.	Abendanon Dooradi	Universitas Indonesia	Pembimbing S1	2026
33.	Habib Ra'uf Alfansuri	Institut Teknologi Bandung	Pembimbing S2	2026
34.	Tyas Nyonita Pujungsari	Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S3	2026

K. Organisasi Profesi Ilmiah

No	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Japan Wood Research Society	2009–2014
2.	Anggota	Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia	2015– 2019
3.	Anggota	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo)	2015–2019
4.	Anggota	JSPS Alumni Association of Indonesia	2017–sekarang

No	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
5.	Anggota	Mikologi Indonesia	2018–sekarang
6.	Anggota	Perhimpunan Periset Indonesia (PPI)	2019–sekarang
7.	Pengurus	Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia	2022–sekarang
8.	Pengurus	Indonesian Structural Biology Association	2025–sekarang

L. Tanda Penghargaan

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	MEXT – Monbukagakusho Scholarship Master Student	MEXT - Japan	2009
2.	MEXT – Monbukagakusho Scholarship Doctoral Student	MEXT - Japan	2011
3.	Presenter Oral Terbaik Japan Wood Research Society Symposium	Japan Wood Research Society, Japan	2011
4.	JSPS HOPE Fellow, The 5th HOPE Meeting with Nobel Laurates	Japan Society for the Promotion of Sciences (JSPS)	2013
5.	Satya Lencana Karya Satya X Tahun	Presiden RI	2015
6.	Anugerah Inventor Award Tahun 2015	Kepala LIPI	2015
7.	Japan – ASEAN Science, Technology and Innovation Platform Network Award	Japan Science and Technology Agency (JST) and RISH Kyoto University, Jepang	2015 - 2025

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
8.	Peringkat Pertama Diklat Jabatan Fungsional Peneliti Tingkat Lanjutan	Kepala Pusat Pembinaan, Pendidikan dan Pelatihan Peneliti LIPI	2016
9.	Science and Technology Research Grant ITSF - Toray	ITSF Toray Foundation	2022
10.	Peneliti dengan Capaian Terbaik BRIN	BRIN	2024
11.	Satya Lencana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI	2025
12.	Kenaikan Pangkat Luar Biasa	Presiden RI	2025

Dunia saat ini menghadapi *triple planetary crisis* yang mencakup pencemaran lingkungan, perubahan iklim, dan hilangnya biodiversitas. Di Indonesia, tekanan tersebut semakin nyata akibat meningkatnya pencemaran limbah industri, khususnya dari sektor tekstil dan petrokimia. Di sisi lain, Indonesia merupakan negara megabiodiversitas dengan kekayaan sumber daya hayati—termasuk mikroorganisme—yang belum dimanfaatkan secara optimal. Kondisi ini membuka peluang strategis untuk menghadirkan solusi berbasis bioteknologi yang berakar pada potensi biodiversitas nasional.

Orasi ilmiah ini menyajikan sintesis pemikiran, capaian riset, serta arah inovasi pengembangan enzim lakase berbasis biodiversitas Indonesia sebagai solusi bioremediasi yang efektif dan berkelanjutan. Pendekatan yang diuraikan bersifat komprehensif, dimulai dari bioprospeksi untuk menemukan sumber lakase unggul, rekayasa dan optimasi sistem enzimatik, hingga aplikasinya dalam degradasi polutan yang kompleks. Hasil-hasil penelitian ini tidak hanya memperkaya khazanah ilmu pengetahuan, tetapi juga menjadi fondasi teknologi bioremediasi yang relevan dengan kebutuhan industri dan lingkungan di Indonesia. Lebih lanjut, orasi ini mengulas peluang dan tantangan pengembangan enzim lakase di Indonesia serta merumuskan arah strategi untuk mendukung hilirisasi dan kemandirian enzim nasional yang selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), kerangka *Bio-Circular-Green* (BCG) *Economy*, serta Asta Cita Presiden Republik Indonesia.

Secara keseluruhan, orasi ini menegaskan bahwa inovasi enzim lakase berbasis biodiversitas Indonesia memiliki potensi besar sebagai kontribusi ilmiah dan strategis dalam menjawab krisis global, sekaligus mendorong transformasi menuju masa depan yang berkelanjutan dan berdaulat secara teknologi.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.3688

ISSN 3090-8485
9 773090 848005