

Potensi Cendawan Pelapuk Putih Indonesia Sebagai Agen Biodekolorisasi Limbah Pewarna Sintetik: Artikel Ulasan

Potency of Indonesian White-Rot Fungi as Biodecolorization Agent for Synthetic Dye Wastewaters: A Review Article

Nurhayat OD¹, Anita SH¹, Yanto DHY¹

¹Pusat Penelitian Biomaterial, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Jln. Raya Jakarta-Bogor KM 46 Cibinong 16911 Jawa Barat, Indonesia

Nurhayat, O. D., Anita, S. H., & Yanto, D. H. Y. (2020). Potensi Cendawan Pelapuk Putih Indonesia Sebagai Agen Biodekolorisasi Limbah Pewarna Sintetik. *Jurnal Mikologi Indonesia*, 4(1), 156–167. doi: 10.46638/jmi.v4i1.75

Abstrak

Limbah pewarna sintetik yang dihasilkan oleh industri tekstil dapat membahayakan ekosistem perairan dan organismenya pada konsentrasi tertentu. Proses dekolorisasi secara biologis menjadi fokus penelitian dalam beberapa tahun terakhir karena prosesnya yang relatif murah dan ramah lingkungan. Cendawan pelapuk putih merupakan salah satu mikroorganisme yang dimanfaatkan untuk memproses limbah pewarna melalui proses enzimatik maupun adsorpsi. Fokus dari review ini adalah untuk membahas cendawan pelapuk putih asal Indonesia yang berpotensi sebagai agen biodekolorisasi limbah pewarna industri tekstil. Beberapa spesies cendawan pelapuk putih asal Indonesia dari genus *Ganoderma*, *Trametes*, *Pleurotus*, dan *Leiotrametes* telah dilaporkan memiliki kemampuan mendekolorisasi beberapa jenis pewarna sintetik golongan antraquinon dan azo. Faktor-faktor seperti jenis cendawan, pH, mediator, aktivitas dan jenis enzim, konsentrasi dan jenis pewarna yang diujikan, waktu inkubasi, dan teknik imobilisasi miselia atau ekstrak enzim lignolitik berpengaruh terhadap proses dekolorisasi secara biologis.

Kata kunci – Cendawan pelapuk putih – pewarna sintetik – dekolorisasi

Abstract

*Synthetic dyes wastewaters released from textile industries became a threat to aquatic ecosystem and organism at certain concentration. The biological decolorization process has become the focus of research in recent years because of the relatively inexpensive and environmentally friendly. White rot fungi are one of the microorganisms that are used to process dye wastewater through enzymatic and adsorption processes. The focus of this review is to discuss white rot fungi from Indonesia which have the potential to be a biodecolorizing agent for dye wastewater in the textile industry. Several species of Indonesian white rot fungi from the genus *Ganoderma*, *Trametes*, *Pleurotus*, and *Leiotrametes* have been reported to have the ability to decolorize several synthetic dyes of anthraquinone and azo groups. Factors such as the type of fungi, pH, mediator, type and activity of enzyme, type and dye concentration, incubation time, and mycelial or enzyme immobilization technique affect the biological decolorization process.*

Keywords – *White rot fungi – synthetic dyes – decolorization*

Pendahuluan

Industri tekstil di Indonesia merupakan industri yang mengalami peningkatan dan berpengaruh besar terhadap peningkatan ekonomi nasional. Hal tersebut karena meningkatnya konsumsi masyarakat Indonesia di bidang *fashion* (CNBC Indonesia, 2018). Namun, peningkatan aktivitas industri tersebut juga berbanding lurus dengan limbah yang dihasilkan dari setiap prosesnya. Bank dunia memperkirakan 17–20 % limbah yang mencemari perairan di dunia berasal dari aktivitas industri tekstil (Chequer *et al.*, 2013). Limbah yang dihasilkan dari industri tekstil, mengandung 10–15 % zat warna tekstil yang ikut terbuang bersama limbah industri (Asad *et al.*, 2007). Limbah tersebut sangat membahayakan lingkungan, khususnya untuk ekosistem perairan. Akumulasi limbah yang mengandung zat warna mengakibatkan menurunnya penyerapan cahaya matahari, sehingga oksigen yang terlarut akan menurun dan menciptakan kondisi anoksik pada suatu perairan. Kondisi tersebut menyebabkan matinya organisme akuatik karena kekurangan oksigen terlarut (Kant *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2015). Selain mengancam keberlangsungan hidup organisme akuatik, kontaminasi limbah pewarna sintetik juga membahayakan kesehatan makhluk hidup lainnya termasuk manusia. Senyawa pewarna dapat masuk ke dalam tubuh melalui sistem pencernaan, sistem pernapasan, dan kulit. Akumulasi senyawa pewarna di dalam tubuh menyebabkan keracunan, gangguan aliran darah, dan kerusakan DNA yang memicu kanker (Carmen & Daniela, 2012).

Pewarna sintetik yang terkandung dalam limbah dapat diklasifikasikan berdasarkan struktur kimianya seperti pewarna azo dan antrakuinon. Pewarna azo dan antrakuinon merupakan pewarna sintetik yang umum digunakan sebagai pewarna tekstil. Oleh karena struktur kimianya yang kompleks, pewarna tersebut sulit untuk didekolorisasi (Gupta, 2009). Beberapa penelitian untuk mengembangkan metode pengolahan limbah pewarna telah banyak dilakukan, baik secara fisika, kimia, maupun biologi. Pengolahan limbah pewarna secara fisika dan kimia membutuhkan waktu yang singkat namun memerlukan biaya tinggi. Selain itu, proses tersebut menghasilkan senyawa sekunder yang beracun dan endapan lumpur dalam jumlah besar. Oleh karena itu, banyak ditemukan laporan penelitian yang lebih memilih metode biologis menggunakan mikroorganisme seperti cendawan dan bakteri karena lebih aman bagi lingkungan dan biaya yang dibutuhkan relatif lebih murah (Ang *et al.*, 2014; Asgher *et al.*, 2016; Shaheen *et al.*, 2017; Brillas & Martínez-huitle, 2015). Proses pengolahan limbah pewarna menggunakan cendawan atau bakteri ini disebut dengan biodekolorisasi. Proses biodekolorisasi limbah pewarna oleh mikroorganisme dapat terjadi melalui mekanisme, absorpsi, degradasi, maupun kombinasi keduanya pada keadaan anaerobik maupun aerobik (Turhan *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2015; Raphael *et al.*, 2018).

Penggunaan mikroorganisme yaitu cendawan pelapuk putih dalam proses biodekolorisasi menjadi perhatian dalam beberapa tahun ini. Beberapa cendawan pelapuk putih seperti *Pleurotus sajor-caju*, *Trametes versicolor*, dan *Ganoderma lucidum* dilaporkan mampu mendekolorisasi beberapa jenis limbah pewarna sintetik seperti remazol brilliant blue R, sandal-fix red C₄BLN, sandal-fix foron blue E₂BLN, sandal-fix golden yellow CRL, sandal-fix violet P4RN, dan sandal-fix black BR (Ang *et al.*, 2014; Asgher *et al.*, 2016; Shaheen *et al.*, 2017). Proses dekolorisasi oleh cendawan pelapuk putih merupakan salah satu proses biodegradasi senyawa kimia yang dibantu oleh enzim. Biodegradasi merupakan suatu proses degradasi senyawa kimia tertentu melalui proses biologis. Hasil dari proses degradasi selanjutnya dinamakan proses mineralisasi yaitu proses degradasi menjadi molekul organik air, karbondioksida, dan senyawa anorganik sebagai produk akhirnya (Kaushik & Malik, 2009). Cendawan pelapuk putih terbukti dapat memproduksi enzim ekstraseluler berupa enzim ligninolitik, yaitu enzim lignin peroksidase (LiP), mangan peroksidase (MnP), dan

lakase (Lac). Enzim ligninolitik yang diproduksi oleh cendawan pelapuk putih digunakan dalam proses mendegradasi senyawa lignin yang kompleks. Enzim yang dihasilkan oleh cendawan pelapuk putih memiliki spesifitas substrat yang luas dan mampu mengoksidasi berbagai substrat. Hal tersebut menyebabkan enzim ligninolitik dapat diaplikasikan untuk mendegradasi beberapa jenis polutan, seperti pewarna sintetik, poliaromatik hidrokarbon, klorofenol, nitrotoluena, dan poliklorin bifenil yang strukturnya mirip dengan lignin (Zeng *et al.*, 2011; Kumar & Chandra, 2020).

Indonesia dikenal sebagai negara tropis yang memiliki biodiversitas tinggi, termasuk spesies cendawan. Darajati *et al.* (2016) melaporkan, peneliti cendawan di Indonesia telah mampu mengidentifikasi 6% jenis cendawan dari seluruh dunia, termasuk cendawan pelapuk putih. Namun, sampai saat ini belum terdapat informasi mengenai pemanfaatan cendawan pelapuk putih di Indonesia dan aplikasi teknologi sistem enzimnya untuk proses pengolahan limbah tekstil. Oleh karena itu, tulisan ini bertujuan untuk memberikan informasi serta gambaran mengenai cendawan pelapuk putih asal Indonesia yang memiliki kemampuan mendekolorisasi pewarna sintetik dan dapat digunakan dalam proses pengolahan limbah industri tekstil. Informasi tersebut diharapkan dapat menjadi acuan mengenai kemajuan penelitian di Indonesia terkait potensi cendawan pelapuk putih sebagai agen biodekolorisasi pewarna sintetik limbah industri tekstil dalam 10 tahun terakhir.

Hasil tinjauan publikasi pada Tabel 1 menunjukkan informasi data-data spesies cendawan dengan kondisi dan hasil dekolorisasi optimum yang berhasil dilaporkan oleh peneliti di Indonesia. Tabel 1 menunjukkan kemampuan cendawan pelapuk putih dalam mendekolorisasi pewarna sintetik dan faktor yang mempengaruhi laju dekolorisasi. Beberapa faktor yang mempengaruhi proses dekolorisasi telah dipelajari oleh peneliti di Indonesia, di antaranya adalah jenis cendawan pelapuk putih, pH, jenis enzim, aktivitas enzim yang digunakan, konsentrasi pewarna, jenis pewarna, waktu inkubasi, serta sistem imobilisasi miselia cendawan dan imobilisasi enzimnya.

Tabel 1. Data cendawan pelapuk putih asal indonesia yang memiliki kemampuan dekolorisasi limbah pewarna

Nama Cendawan	Pewarna/konsentrasi	Persentase Dekolorisasi (%) / waktu	Mekanisme dekolorisasi / faktor yang mempengaruhi	Lokasi	Pustaka
<i>Trametes</i> sp. AS03	Remazol B. Violet (V5) / Td	91 / 7 hari	Biodegradasi (enzim lakase dan manganase peroksidase)	Hutan Mangrove Sungai Pakning dan Tanjung Buton - Provinsi Riau Indonesia	Hidayat & Tachibana (2014)
	Levafix Orange E3GA (Or64) / Td	31 / 7 hari			
	Levafix B. Red E-6BA (R159) / Td	48 / 7 hari			
Cendawan pelapuk putih (KRUS-G)	Sumifix S. Scarlet 2GF (R222) / Td	60 / 7 hari	Biodegradasi (enzim lakase)	Kebun Raya Universitas Mulawarman, Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia	Sumandono <i>et al.</i> (2015)
	Remazol Brilliant Blue R (RBBR) /100 ppm	84 / 6 hari			
	RBBR / 500 ppm	93,32/ 6 hari			
<i>Ganoderma</i>	Naphtol	58, 79 / 20	Biodegradasi (enzim	Budidaya Jamur	Pratiwi <i>et al.</i>

<i>lucidum</i>	Black (NB) / 50 ppm	hari	lakase)	Media Agro Merapi Kaliurang, Yogyakarta	(2017)
<i>Ganoderma</i> sp	Remazol Black B (RBB)/ 70 ppm	89,23/7 hari	Biodegradasi (Sel miselia menghasilkan enzim ligninolitik)	Bali, Indonesia	Sudiana et al. (2018)
	RBB/ 70 ppm	90,82/ 7 hari	Biodegradasi (ekstrak kasar enzim ligninolitik)		
<i>Leiotrametes flavida</i> ZUL62	RBBR / 100 ppm	62 / 24 jam	Biodegradasi (enzim lakase)	Hutan Bangka Belitung,	Falah et al. (2018)
<i>Trametes hirsuta</i> D7	RBBR / 100 ppm	95,57 / 7 jam	Biodegradasi (Ekstrak Enzim kasar kombinasi enzim lakase dan mangan peroksidase)	Area hutan gambut di Riau	Anita <i>et al.</i> (2019)
	RBBR / 200 ppm	93,46 / 7 jam			
	RBBR / 300 ppm	91,84/ 7 jam			
	RBBR / 400 ppm	86,44/ 7 jam			
	RBBR / 500 ppm	82,14/ 7 jam			
	Acid Blue 129 (AB 129) / 100 ppm	94,59/ 7 jam			
	Acid Orange 7 (AO7) / 100 ppm	13,99/ 7 jam			
Reactive Black 5 (RB 5) / 100ppm	7,61/ 7 jam				
Methyl Violet (MV)/ 100 ppm	7,59/ 7 jam				
<i>Trametes hirsuta</i> D7	RBBR / 20 mL	35/ 24 jam	Biodegradasi (enzim lakase) Penggunaan <i>light expanded clay aggregate</i> (LECA) teraktivasi untuk imobilisasi miselia	Area hutan gambut di Riau	Ardiati et al. (2019)
	RBBR / 100 mg/dm ³ ,	88/ 3 hari	Biodegradasi (enzim lakase) LECA tidak di liofilisasi untuk imobilisasi miselia		
	RBBR / 0,2 g/ml	94/ 3 jam	Biodegradasi (enzim lakase)/ LECA tidak di liofilisasi untuk imobilisasi miselia		
<i>Trametes sp.</i> EDN084	RBBR / Td	50,54/ 4 jam	Biodegradasi (enzim lakase)	Taman Eden 100, Toba, Sumatera Utara	Yanto et al. (2019)
	Acid Blue (AB 25) / Td	21,23/ 4 jam			
	AB 129 / Td	52,2/ 4 jam			
	Reactive Blue 4 / Td	46,65/ 4 jam			

	AO7 / Td	11,5/ 4 jam		
	RB5/ Td	1,98/ 4 jam		
	Reactive Red 120 (RR120)/ Td	2,41/ 4 jam		
	Acid Blue 113 (AB 113) / Td	39,58/ 4 jam		
	Direct Blue 71/ Td	58,90/ 4 jam		
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Methylene blue/Td	Td/12 jam	Biodegradasi (enzim ligninolitik)/ Ekstrak enzim kasar yang di imobilisasi pada zeolit	Td Dimawarnita & Tripanji (2019)
	Congo Red/Td	Td/12 jam	Biodegradasi (enzim ligninolitik)/ Ekstrak enzim kasar yang di imobilisasi pada zeolit	
<i>P. ostreatus</i>	RBBR/100 ppm	75,88/48jam	Biodegradasi dan Biosorpsi (enzim ligninolitik)/ Ekstrak enzim ligninolitik diimobilisasi pada Ca- Alginat	Td Dewi et al. (2019)
	Naphtol/100 ppm	94,867/24 jam	Biodegradasi dan Biosorpsi (Enzim ligninolitik)/ Ekstrak enzim ligninolitik diimobilisasi pada Ca- Alginat	

Td: tidak dilaporkan

Jenis Cendawan Pelapuk Putih

Cendawan pelapuk putih merupakan kelompok cendawan yang mudah dijumpai di alam terutama pada batang kayu yang sudah mati maupun yang masih hidup. Cendawan ini, diketahui memanfaatkan polimer-polimer pada kayu yang mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dimanfaatkannya sebagai sumber energinya melalui proses enzimatisnya. Enzim tersebut meliputi lignin peroksidase (LiP), mangan peroksidase (MnP) dan lakase (Lac) yang memiliki aktivitas mendegradasi lignin (Rodriguez-Couto, 2017). Struktur lignin yang mirip dengan struktur kimia pada pewarna sintetik, mendorong pemanfaatan enzim ligninolitik untuk mendegradasi pewarna sintetik (Ang et al., 2014; Asgher et al., 2016; Shaheen et al., 2017). Sumandono et al. (2015) melaporkan dari 24 isolat cendawan yang diisolasi hanya satu isolat cendawan yaitu isolat KRUS-G yang mampu mendekolorisasi pewarna RBBR. Isolat KRUS-G juga dilaporkan mampu mendekolorisasi pewarna RBBR pada konsentrasi 1000 dan 1500 ppm jika dibandingkan dengan jenis cendawan *Ceriperiopsis subvermispota* dan *Phanerochaete cryosporium* yang diisolasi di Jepang. Falah et al. (2018) melaporkan, dari 13 isolat, sebanyak 5 isolat mampu mendekolorisasi lebih dari 95%. RBBR (100 mg/L) pada media agar dan satu isolat diidentifikasi sebagai *L. flavida* strain Zul62. Pada Tabel 1 juga menunjukkan, setiap jenis cendawan memiliki kemampuan yang berbeda-beda dalam proses dekolorisasi pewarna sintetik. Spesies *Trametes* merupakan spesies yang memberikan hasil dekolorisasi tinggi pada spektrum pewarna yang beragam. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Anita et al. (2019) dan Ardiati et al. (2019) menunjukkan spesies *T. hirsuta* sp. D7 memiliki kemampuan mendekolorisasi pewarna yang beragam, yaitu dari golongan antrakuinon (RBBR dan AB129), azo (AO7 dan RB5), dan trimethyl methane (MV).

pH

Pengaruh pH terhadap proses dekolorisasi, berkaitan dengan enzim ligninolitik ekstraseluler yang disekresikan oleh cendawan pelapuk putih, dan memiliki pH optimum pada suasana asam. Enzim merupakan protein yang tersusun atas asam aminonya. Asam amino penyusun enzim memiliki sisi aktif yang dipengaruhi oleh pH dalam proses ionisasinya. Proses tersebut berfungsi menstabilkan konformasi sisi aktif enzim dalam mengikat dan mengubah substrat menjadi produk. Pada pH asam, gugus karboksil asam amino penyusun enzim, lebih banyak mengikat ion H^+ sehingga gugus amino menjadi bermuatan positif. Sebaliknya, jika enzim berada pada pH basa, gugus amino lebih banyak melepas ion H^+ , sehingga muatannya menjadi netral dan gugus karboksilnya bermuatan negatif. Kondisi tersebut, berpengaruh terhadap struktur molekul dan aktifitas katalitik enzim. Selain itu, reaksi oksidasi bergantung pada redoks potensial pewarna sebagai substrat. Proses ionisasi substrat dipengaruhi oleh pH dan karenanya mempengaruhi kapasitasnya enzim untuk bertindak sebagai katalisator pendegradasinya. Perubahan pH terlalu rendah dan terlalu tinggi juga menyebabkan denaturasi terhadap enzim, sehingga menurunkan aktivitas enzim (Kaushik & Malik, 2009).

Penelitian yang dilakukan oleh Hidayat & Tachibana (2014) melaporkan, pada kondisi alkali dengan pH 8,2 menurunkan kemampuan *Trametes* sp. AS03 hampir 10% untuk mendekolorisasi pewarna dari golongan azo yaitu remazol b. violet (V5), levatix b. red E-6BA (R159), levatix orange E3 GA Or64 dan sumifix s. scarlet 2 GF (R222) sebesar 83, 42, 31 dan 58% dibandingkan dengan pH 4,5. Selanjutnya, isolat cendawan pelapuk putih (KRUS-G) yang diteliti oleh Sumandono *et al.* (2015) mampu mendekolorisasi pewarna antrakuinon RBBR sebesar 89% pada pH 4. Sudiana *et al.* (2018) juga melaporkan, pH 6 merupakan kondisi optimum untuk isolat *Ganoderma* sp. mendekolorisasi pewarna remazol black B (RBB) sebesar 89,23 %. Sedangkan untuk ekstrak enzim kasar dari isolat *Ganoderma* sp. mampu mendekolorisasi RBBR sebesar 90,82 % pada pH 4.

Mediator

Mediator dalam proses dekolorisasi oleh enzim berperan dalam pertukaran elektron terhadap substrat berukuran besar yang tidak mampu mengisi sisi aktif enzim. Enzim mengoksidasi mediator untuk membentuk radikal dengan potensial redoks tinggi dan selanjutnya radikal tersebut akan mengoksidasi pewarna sebagai substrat sehingga akan tereduksi. Dalam proses tersebut, enzim mengoksidasi pewarna secara tidak langsung dengan bantuan mediator (Hu *et al.*, 2009; Christopher *et al.*, 2014; Mani *et al.*, 2018). Penelitian yang dilakukan oleh Yanto *et al.* (2019) menunjukkan, konsentrasi mediator violuric acid (VA) sebesar 1 mM mampu meningkatkan dekolorisasi hingga 2–30 kali lipat. Peningkatan dekolorisasi dari pewarna antrakuinon meningkatkan secara signifikan menjadi 78,73%, 69,97%, 85,76%, dan 83,57% berturut-turut terhadap pewarna RBBR, AB25, AB129, dan RB4 setelah 4 jam inkubasi menggunakan ekstrak enzim lakase. Peningkatan aktivitas dekolorisasi ekstrak enzim dari *T. hirsuta* D7 mencapai 10 kali lipat dibandingkan dengan kontrol juga di laporkan oleh Anita *et al.*, (2019) menggunakan konsentrasi 2 mM mediator $MnSO_4$, H_2O_2 dan VA. Penelitian yang dilakukan oleh Yanto *et al.* (2019) dan Anita *et al.* (2019) menunjukkan, enzim ligninolitik yang dikeluarkan oleh cendawan pelapuk putih berperan dalam proses dekolorisasi. Namun, enzim ligninolitik dalam proses dekolorisasinya memiliki batasan dalam proses katalisis dekolorisasi pewarna yang memiliki ukuran besar, sehingga tidak mampu berikatan dengan sisi aktif enzimnya.

Jenis Enzim dan Aktivitasnya

Cendawan pelapuk putih di alam merupakan mikroorganisme penting yang berperan dalam proses degradasi lignin dalam siklus karbon. Cendawan pelapuk putih mengeluarkan

enzim ekstraseluler yaitu enzim ligninolitik yang mampu mendegradasi lignin untuk digunakan sebagai sumber nutrisi pertumbuhannya. Ada tiga jenis enzim ekstraseluler yang diproduksi oleh cendawan pelapuk putih yang bersifat universal, namun efektif dalam mendegradasi lignin. Ketiga enzim tersebut adalah lignin peroksidase (LiP), mangan peroksidase (MnP) dan lakase (Lac). Struktur kimia dari pewarna, mirip dengan struktur lignin (Howard *et al.*, 2003). Hal tersebut, dimanfaatkan oleh para peneliti untuk menggunakan enzim ligninolitik sebagai agen pendegradasi senyawa pewarna sintetik melalui proses katalisis enzim (Zeng *et al.*, 2011; Howard *et al.*, 2003). Penelitian Sudiana *et al.* (2018) menunjukkan, enzim yang berperan dalam proses dekolorisasi baik melalui isolat murni dan ekstrak enzim kasar *Ganoderma* sp. adalah LiP dan MnP. Dewi *et al.* (2019) melaporkan, aktivitas enzim ligninolitik untuk mendekolorisasi pewarna RBBR dan naphtol didominasi oleh aktivitas enzim LiP dibandingkan dengan enzim Lac dan MnP. Hal tersebut diduga, tidak semua spesies cendawan pelapuk putih mampu memproduksi enzim LiP dengan optimum. Enzim LiP memiliki gugus heme dengan potensial redoks yang tinggi yang memerlukan metabolit berupa H₂O₂. Enzim tersebut mampu mengoksidasi gugus metoksil pada cincin aromatik substrat yang memiliki potensial redoks cukup tinggi (Kumar & Chandra, 2020).

Anita *et al.* (2019) melaporkan dekolorisasi pewarna oleh enzim ligninolitik dari *T. hirsuta* D7, terdiri dari kombinasi dari enzim mangan peroksidase (MnP) dan lakase. Enzim MnP memiliki kemampuan mengoksidasi senyawa fenolik melalui proses redoks ion Mn²⁺ menjadi Mn³⁺ dengan bantuan H₂O₂, sedangkan enzim lakase mampu mengoksidasi senyawa fenolik pada pewarna azo, dan gugus amina aromatik melalui proses reduksi dua atom oksigen menjadi air (Kumar & Chandra, 2020). Hasil penelitian Hidayat & Tachibana (2014) menunjukkan adanya kombinasi aktivitas enzim MnP dan Lac dalam proses dekolorisasi pewarna azo oleh isolat *Trametes* sp. AS03. Sementara itu, Sumandono *et al.* (2015) melaporkan bahwa proses dekolorisasi RBBR oleh isolat KRUS-G dipengaruhi oleh aktivitas enzim lakase, walaupun aktivitas enzim MnP ditemukan dalam jumlah yang tinggi. Enzim lakase dari isolat *L. flavida* diketahui mampu mendekolorisasi pewarna RBBR (Falah *et al.*, 2018). Ardiati *et al.* (2019) juga melaporkan bahwa yang berperan dalam proses dekolorisasi pewarna dalam perlakuan imobilisasi miselia *T. hirsuta* D7 dengan LECA adalah enzim lakase.

Konsentrasi enzim yang digunakan juga memberikan pengaruh terhadap proses dekolorisasi. Anita *et al.* (2019) melaporkan, proses dekolorisasi lebih efisien ketika diberikan enzim dengan konsentrasi 0,25–4,00 U/mL dengan dekolorisasi maksimum antara 95,57–100%. Selain itu, Dimawarnita & Tripanji (2019) melaporkan proses imobilisasi ekstrak enzim kasar ligninolitik *P. ostreatus* dengan konsentrasi 0,5% merupakan konsentrasi optimum karena mampu mendekolorisasi methylene blue dan congo red dalam waktu 12 jam.

Konsentrasi Pewarna

Pemberian konsentrasi pewarna remazol black B sebesar 10–100 mg/L berpengaruh terhadap kemampuan dekolorisasi isolat *Ganoderma* sp. dan ekstrak enzim kasarnya (Sudiana *et al.*, 2018). Peningkatan konsentrasi pewarna yang diberikan berbanding terbalik dengan kemampuan dekolorisasinya. Pemberian konsentrasi pewarna yang semakin tinggi akan membuat sisi aktif enzim akan menjadi jenuh. Anita *et al.* (2019) menggunakan variasi konsentrasi pewarna RBBR yaitu 100, 200, 300, 400, dan 500 ppm dengan konsentrasi enzim konstan. Penggunaan konsentrasi RBBR 100 ppm menghasilkan dekolorisasi maksimum sebesar 95,57 ± 0,32%. Semakin tinggi konsentrasi pewarna RBBR yang diberikan, menyebabkan pertumbuhan miselia cendawan menurun karena kondisi konsentrasi tinggi bersifat racun sehingga menurunkan kemampuan dekolorisasi cendawan pelapuk putih (Sumandono *et al.*, 2015). Falah *et al.* (2018) melaporkan bahwa dekolorisasi oleh enzim

lakase dari *L. flavida* dipengaruhi oleh konsentrasi pewarna RBBR yang diberikan. Enzim lakase mampu mendekolorisasi sebesar 62% dalam 24 jam namun setelah diberikan konsentrasi 1000 ppm kemampuan dekolorisasinya menurun menjadi 17%. *Ganoderma lucidum* yang diteliti oleh Pratiwi *et al.* (2017) menunjukkan peningkatan konsentrasi dari limbah pewarna batik diikuti oleh peningkatan persentase dekolorisasi yang dihasilkan. Hal tersebut dapat disebabkan karena isolat mulai beradaptasi seiring dengan perlakuan masa inkubasi untuk proses dekolorisasinya.

Jenis Pewarna

Zat warna merupakan senyawa organik yang memiliki struktur kimia yang terdiri dari ikatan rangkap terkonjugasi dan gugus aromatik yang terdiri dari cincin *aryl* yang mengandung sistem elektron terdelokalisasi. Sebagian besar pewarna sintetik terdiri dari golongan antrakuinon, azo, dan trimethyl methane (Palencia *et al.*, 2017). Jenis pewarna azo yaitu V5, R222, R159, Or64 berturut-turut dapat terdecolorisasi sebesar 91%, 60%, 48 % dan Or64 31% oleh *Trametes* sp. AS03 (Hidayat & Tachibana, 2014). Anita *et al.* (2019) melaporkan pengujian kemampuan dekolorisasi terhadap jenis pewarna dari golongan antrakuinon, azo, dan trimethyl methane berturut-turut yaitu AB129, AO7, RB5, dan MV. Proses dekolorisasi ke-empat pewarna tersebut menggunakan ekstrak enzim ligninolitik dari *T. hirsuta* D7. Hasil penelitian menunjukkan, enzim tersebut paling efektif mendekolorisasi pewarna dari golongan antrakuinon AB129 sebesar 94,59%, sedangkan pewarna monoazo AO7, diazo RB5, dan trimethyl methane MV berturut-turut hanya sebesar 13,99%, 7,61% dan 7,59%. Dalam penelitian Anita *et al.* (2019) menunjukkan urutan pewarna yang lebih mudah terdecolorisasi yaitu AB129>AO7>RB5>MV. Hal tersebut diduga pada saat enzim mengoksidasi pewarna antrakuinon, elektron dari enzim akan ditranser ke dalam struktur kimia senyawa pewarna yang memiliki ikatan terkonjugasi. Ikatan terkonjugasi antara kromofor dan ausokrom pada pewarna antrakuinon tidak terlalu kuat sehingga oksidasi enzim akan mengubah konfigurasi struktur kimia pewarna dan intensitas warna akan memudar. Sementara itu, pewarna azo dan trimethyl methane memiliki ikatan yang sangat kuat antara gugus kromofor dan ausokromnya sehingga sulit untuk dioksidasi oleh enzim ligninolitik jamur pelapuk putih (Lade *et al.*, 2014; Lavanya *et al.*, 2014; Bonetto *et al.*, 2015). Yanto *et al.* (2019) melaporkan enzim lakase dengan aktivitas 0,1 U/mL lebih mudah untuk mendekolorisasi pewarna dari golongan antrakuinon dibandingkan dengan pewarna azo. Oleh karena itu pewarna yang memiliki struktur kimia yang lebih sederhana lebih cepat didecolorisasi dibandingkan pewarna yang memiliki struktur kimia yang lebih kompleks.

Waktu Inkubasi

Waktu inkubasi berpengaruh terhadap proses adsorpsi oleh matriks dalam proses dekolorisasi limbah pewarna (Alvarez *et al.*, 2010). Semakin lama waktu inkubasi, kontak dan adsorpsi pewarna oleh suatu matriks penjerap menjadi semakin besar yang selanjutnya akan dilanjutkan melalui proses dekolorisasi oleh enzim ligninolitik yang terjerap dalam matriks tersebut (Abbas *et al.*, 2014; Fomina & Gadd, 2014). Pengaruh waktu inkubasi disimulasikan oleh Sudiana *et al.* (2018) menggunakan isolat *Ganoderma* sp. dan ekstrak enzim kasar. Proses dekolorisasi maksimum terjadi pada hari ke 10 dengan dekolorisasi mencapai 89,91% oleh isolat *Ganoderma* sp. dan ekstrak enzim kasar sebesar 91,84%. Hidayat & Tachibana (2014) juga melaporkan aktivitas dekolorisasi pewarna azo oleh *Trametes* sp. AS03 meningkat selama 1–3 hari masa inkubasi. Isolat KRUS-G mulai efektif mendekolorisasi setelah hari ke-6 inkubasi dengan dekolorisasi sebesar 84% dan 93,32% pada konsentrasi RBBR 100 dan 500 ppm (Sumandono *et al.*, 2015). Waktu inkubasi optimum enzim lakase *Trametes* sp. EDN 084 untuk mendekolorisasi pewarna antrakuinon dan azo adalah 4 jam (Yanto *et al.*, 2019). Sedangkan laju dekolorisasi isolat *G. lucidum*,

meningkat dengan bertambahnya waktu inkubasi. Dekolorisasi optimum sebesar 58,79% pada hari ke-20 dari total waktu 30 hari dengan konsentrasi pewarna 50 ppm (Pratiwi *et al.*, 2017). Ardiati *et al.* (2019) melaporkan, waktu inkubasi mempengaruhi aktivitas enzim lakase yang dihasilkan oleh isolat *T. hirsuta* D7 yang terimobilisasi. Persentase dekolorisasi meningkat dari 76% pada 3 jam pertama menjadi 94% setelah 24 jam inkubasi dengan penambahan dosis *T. hirsuta* D7 terimobilisasi LECA sebesar 4 g/20 mL larutan pewarna. Seiring penurunan dekolorisasi, aktivitas enzim lakase tertinggi tercatat sebesar 460 U/L pada 3 jam pertama inkubasi. Hal tersebut terjadi karena semakin lama waktu inkubasi sel miselia yang terimobilisasi mensekresikan enzim lakase ke medium yang mengandung pewarna dan memulai proses oksidasinya sehingga pewarna dapat terdecolorisasi (Wesenberg *et al.*, 2003). Dewi *et al.* (2019) juga melaporkan pengaruh waktu inkubasi terhadap kemampuan dekolorisasi enzim ligninolitik *P. ostreatus* yang terimobilisasi oleh matriks Ca-alginat terhadap pewarna RBBR dan naphtol. Perlakuan dekolorisasi dengan sistem statis memberikan persentase dekolorisasi optimum sebesar 75,88% terhadap pewarna RBBR dengan kondisi optimum waktu inkubasi selama 48 jam. Sedangkan pewarna naphtol dari limbah batik mampu didecolorisasi optimum sebesar 94,867% pada waktu inkubasi selama 24 jam.

Teknik Imobilisasi Miselia atau Ekstrak Enzim Ligninolitik Untuk Dekolorisasi

Teknik imobilisasi miselia cendawan atau enzimnya merupakan teknik untuk menyimpan miselia atau enzim dalam suatu matriks yang dapat menjaga aktivitasnya dan dapat digunakan berulang kali dengan efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan (Homaei *et al.*, 2013). Teknik dekolorisasi menggunakan imobilisasi miselia memiliki beberapa kelebihan diantaranya tidak memerlukan proses ekstraksi dan pemurnian enzim, dapat digunakan didalam substrat (pewarna) yang berkonsentrasi tinggi, mempertahankan jangka hidup sel miselia dalam waktu yang lama, dapat digunakan berulang kali, memiliki konsentrasi sel miselia dalam jumlah tinggi, dan melindungi sel dari pengaruh lingkungan (Couto, 2009; Homaei *et al.*, 2013). Sedangkan teknik dekolorisasi menggunakan imobilisasi enzim, memiliki beberapa kelebihan diantaranya memberikan peluang dalam reaksi bertahap dalam proses katalitik suatu enzim, menjaga aktivitas enzim dalam agar tetap tinggi. dan menjaga stabilitas enzim dari pengaruh kondisi lingkungan (Abbas *et al.*, 2014; Fomina & Gadd, 2014; Mohamad *et al.*, 2015).

Ardiati *et al.* (2019) menggunakan bahan LECA sebagai material untuk mengimobilisasi miselia cendawan *T. hirsuta* D7 dan digunakan untuk dekolorisasi pewarna sintetik RBBR. LECA terimobilisasi miselia cendawan *T. hirsuta* D7 mampu mendekolorisasi pewarna RBBR sebesar 88% dibandingkan kontrol (LECA tanpa miselia terimobilisasi) yang hanya mampu mendekolorisasi sebesar 35%. Selain LECA, material lain seperti zeolit juga dapat digunakan sebagai material untuk imobilisasi enzim. Dimawarnita & Tripanji (2019) menggunakan zeolit untuk mengimobilisasi ekstrak enzim kasar ligninolitik yang dihasilkan oleh *P.ostreatus* dengan beberapa variasi konsentrasi untuk mendekolorisasi pewarna *congo red* dan *methylene blue*. Sementara itu, Dewi *et al.* (2019) menggunakan matriks Ca-alginat untuk mengimobilisasi enzim ligninolitik untuk mendekolorisasi pewarna RBBR dan naphtol. Penelitian tersebut menunjukkan dalam proses dekolorisasi terjadi proses biosorpsi oleh Ca-alginate yang mengimobilisasi enzim. Pewarna yang terserap oleh matriks Ca-alginat selanjutnya akan didecolorisasi secara enzimatik oleh enzim ligninolitik yang terjerap dalam matriks tersebut (Abbas *et al.*, 2014; Fomina & Gadd, 2014). Penelitian yang dilakukan oleh Yanto *et al.* (2017) menjelaskan, penggunaan teknik imobilisasi enzim ligninolitik pada matrik polivinil alkohol/alginat (dengan rasio 1,5/6) yang direaksikan dengan asam borat 7% mampu memberikan hasil terbaik dalam mendekolorisasi pewarna RBBR.

Kesimpulan dan Saran

Penelitian mengenai cendawan pelapuk putih di Indonesia yang telah dipublikasi masih dalam skala laboratorium dan menunjukkan hasil yang bervariasi. Spesies cendawan pelapuk putih dari genus *Ganoderma*, *Trametes*, *Leiotrametes* dan *Pleurotus* dikonfirmasi peneliti Indonesia mampu mendekolorisasi beberapa jenis pewarna baik menggunakan miselia cendawan maupun ekstrak enzim. Proses dekolorisasi yang dipublikasikan merupakan proses biodegradasi oleh enzim ligninolitik yang dihasilkan oleh cendawan pelapuk putih asal Indonesia. Adapun beberapa faktor yang mempengaruhi dalam proses dekolorisasi pewarna sintetik secara biologis yaitu jenis cendawan, pH, mediator, jenis enzim, aktivitas enzim, jenis pewarna yang diujikan, konsentrasi pewarna yang digunakan, waktu inkubasi, dan teknik imobilisasi miselia/ekstrak enzim ligninolitik. Informasi mengenai penelitian dekolorisasi oleh cendawan pelapuk putih asal Indonesia masih terbatas sehingga penelitian mengenai cendawan pelapuk putih masih perlu dilakukan. Pengembangan penelitian dan aplikasi dalam skala industri penting dilakukan oleh peneliti di Indonesia, agar dapat diperoleh informasi mengenai kemampuan cendawan pelapuk putih di lapangan yang memiliki kondisi berbeda dengan kondisi di laboratorium.

Pustaka

- Abbas, S. H., Ismail, I. M., Mostafa, T. M., & Sulaymon, A.H. (2014). Biosorption of heavy metals: A review. *Journal of Chemical Science and Technology*, 3(4), 74–102.
- Alvarez, L. H., Perez-Cruz, M. A., Rangel-Mendez, J. R., & Cervantes, F. J. (2010). Immobilized redox mediator on metal-oxides nanoparticles and its catalytic effect in a reductive Decolorization Process. *Journal of Hazardous Materials*, 184.
- 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 Sciences*, 23(1), 44–50.
- 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: Earth and Environmental. Science*, 308, 012002.
- Ang, T. N., Ngoh, G. C., Chua, A. S. M., & Ismail, I. (2014). Remazol brilliant blue R dye decolorization by lacasse produced by *Pleurotus sajor-caju* via solid state fermentation. *Proceed. the Regional Conference on Chemical Engineering*, 1–6.
- Asgher, M., Noreen, S., & Bilal, M. (2016). Enhancing catalytic functionality of *Trametes versicolor* IBL- 04 laccase by immobilization on chitosan microspheres. *Chemical Engineering Research and Design*, 119, 1–11.
- Asad, S., Amoozegar, M. A., Pourbabaee, A. A., Sarbolouki, M. N., & Dastgheib, S. M. M. (2007). Decolorization of textile azo dyes by newly isolated halophilic and halotolerant bacteria. *Bioresources Technology*, 98, 2082–2088.
- Bonetto, Lr., Ferrarini, F., De Marco, C., Crespo, J. S., Guegan, R., & Giovanella, M. (2015). Removal of methyl violet 2B dye from aqueous solution using a magnetic composite as an adsorbent. *Journal of Water Process and Engineering*, 6, 11–20.
- Brillas, E., & Martínez-Huitle, C. A. (2015). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166–167, 603–643.
- Carmen, Z. & Daniella, S. (2012). Textile organic dyes-characteristics, polluting effects, and separation/elimination procedurs from industrial effluents- A critical overview, organic pollutant ten year after the stockholm convention-Environmental and analytical update, Dr. Tomasz Puzyn (Ed). ISBN: 978-953-307-9172-2, InTech, available from: <http://www.Intechopen.com>

- Christopher, L. P., Yao, B., & Ji, Y. (2014). Lignin biodegradation with laccase-mediator systems. *Frontiers in Energy Research*, *12*, 1–8.
- Chequer, F. M. D., De Oliveira, G. A. R., Ferraz, E. R. A., Cardoso, J. C., Zanoni, M. V. B., & de Oliveira, D. P. (2013). Textile Dyes: Dyeing process and environmental impact. In *Ecofriendly textile dyeing and finishing*. M. Gunay (ed.). Chapter 6 pp 151 ISBN 978-953-51-0892-4
- Couto, S. R. (2009). Dye removal by immobilised fungi. *Biotechnology Advance*, *27*(3), 227–235.
- Darajati, et al. (2016). Indonesian Biodiversity Strategy and Action Plan 2015–2020. Jakarta, Bappenas.
- Dewi, R. S., Ilyas, M., & Sari, A. A. (2019). Ligninolytic enzyme immobilization from *Pleurotus ostreatus* for Dye and Batik Waste water Decolorization. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, *8*(2), 220–229.
- Dimawarnita, F., & Tripanji. (2019). Aktifitas enzim ligninolitik *Pleurotus Ostreatus* pada media yang mengandung TKKS dan aplikasinya untuk Dekolorisasi Zat Warna. *Menara Perkebunan*, *87*(1): 31–40.
- Falah, S., Nuzulia, M. S., & Hidayat, A. (2018). Decolorization of remazol brilliant blue R by laccase of newly Isolated *Leiotrametes Flavida* strain ZUL62 from Bangka Heath Forest. *Biodiversitas*, *19*(2), 633–39.
- Fomina, M., & Gradd, G. M. (2014). Biosorption: Current Perspective on Concept, Definition and Application. *Bioresource Technology*, *160*, 3–14.
- Gupta, V. K. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, *90*(8), 2313–42.
- Hidayat, A., & Tachibana, S. (2014). Decolorization of azo dyes and mineralization of phenantherene by *Trametes* sp AS03 Isolated from Indonesia Mangrove forest. *Indonesia Journal of Forestry Research*, *1*(1), 67–75.
- Homaei, A. A., Sariri, R., Vianello, F., & Stevanato, R. (2013). Enzyme Immobilization: An Update. *Journal of Chemical Biology*, *6*(4), 185–205.
- Howard, R., Abotsi, L., Rensburg, E. J., Howard, S. L. (2003). Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *African Journal of Biotechnology*, *2*(12), 602–619.
- Hu, Mr., Chao, Y. P., Zhang, G. Q., Xue, Z. Q., & Qian, S. (2009). Laccase-mediator system in the decolorization of different types of recalcitrant dyes. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *36*(1), 45–51.
- Indonesia, CNBC. (2018). Industri Tekstil RI: Hidup Segan, Mati Tak Mau. <https://www.cnbcindonesia.com/news/20180914151304-4-33156/industri-tekstil-ri-hidup-segan-mati-tak-mau>. (Diakses 1 Juni 2020).
- Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural Science*, *4*, 22–26.
- Kaushik, P., & Anushree, M. (2009). Fungal dye decolourization: Recent advances and future potential. *Environment International*, *35*(1):127–41.
- Kumar, A., & Chandra, R. (2020). Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment. *Heliyon*, *6*, e03170.
- Lade, H., Kadam, A., Paul, D., & Govindwar, S. (2014). Biodegradation and detoxification of textile azo dyes by bacterial consortium under sequential microaerophilic/aerobic process. *Experimental and Clinical Science Journal*, *14*, 158–174.
- Lavanya, C., Dhankar, R., Chhikara, S., & Sheoran, S. (2014). Degradation of toxic dyes: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *3*(6), 189–199.

- Mani, P., Kumar, V. T. F., Keshavarz, T., Chandra, T. S., & Kyazze, G. (2018). The role of natural laccase redox mediators in simultaneous dye decolorization and power production in microbial fuel cells. *Energies*, *11*(12), 3455.
- Mohamad, N. R., Marzuki, N. H. C., Buang, N. A., Huyop, F., & Wahab, R. A. (2015). An overview of technologies for immobilization of enzymes and surface analysis techniques for immobilized enzymes. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, *29*(2), 205–220.
- Pratiwi, D., Indrianingsih, A. W., & Cici, D. C. (2017). Decolorization and degradation of Batik dye effluent using *Ganoderma lucidum*. *IOP Conf. Ser: Earth Environmental Sciences*, *101*, 012034.
- Palencia, M., Martinez, J. M., & Arrieta, A. (2017). Removal of acid blue 129 dye by polymerenhanced ultrafiltration (PEUF). *Journal of Science with Technological Applications*, *2*, 65–74.
- Raphael, L. A. S., Romeo, M. P. B. C., Glenda, H. G. M. S. P., Felype, T. B., Raquel, P. B., Ana Lucia, F. P., & Marcia, V. S. (2018). Fungi of biotechnological interest in the discoloration of textile effluents. *Trends in Engineering & Fashion Technology*, *4*(3), TTEFT.000587.
- Rodriguez-Couto, S. (2017). Industrial and environmental applications of white-rot fungi. *Mycosphere*, *8*(3), 456–466.
- Shaheen, R., Asgher, M., Hussain, F., & Bhatti, H. N. (2017). Immobilized lignin peroxidase from *Ganoderma lucidum* IBL-05 with improved dye decolorization and cytotoxicity reduction properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, *103*, 57–64.
- Singh, R. L., Singh, P. K., & Singh, R. P. (2015). Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes—A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *104*, 21–31.
- Sumandono, T., Saragih, H., Watanabe, T., & Amirta, R. (2015). Decolorization of remazol brilliant blue R by new isolated white rot fungus collected from tropical rain forest in East Kalimantan and its ligninolytic enzymes activity. *Procedia Environmental Sciences*, *28*, 45–51.
- Sudiana, I. K., Sastrawidana, D. K., & Sukarta, I. N. (2018). Decolorization study of remazol black B textile dye using local fungi of *Ganoderma* sp. and their ligninolytic enzymes. *Journal of Environmental Science and Technology*, *11*(1), 16–22.
- Turhan, K., Durukan, L., Ozturkcan, S. A., & Turgut, Z. (2012). Decolorization of textile basic dye in aqueous solution by ozone. *Dyes Pigments*, *92*(3), 897–901.
- Wesenberg, D., Kyriakides, I., & Agathos, S. N. (2003). White-rot fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. *Biotechnol Advances*, *22*, 161–187.
- Yanto, D. H. Y., Auliana, N., Anita, S. H., & Watanabe, T. (2019). Decolorization of synthetic dyes by laccase from new *Trametes hirsuta* EDN084 mediated by violuric acid. *IOP conf.ser: Earth Environmental Sciences*, *374*, 012005.
- 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.
- Zeng, X., Yujie, C., Xiangru, L., Xianglong, Z., Wenxiu, L., & Dabing, Z. (2011). Decolorization of synthetic dyes by crude laccase from a newly isolated *Trametes trogii* strain cultivated on solid agro-industrial residue. *Journal of Hazardous Materials*, *187*(1–3), 517–525.