



CURRENT BIOCHEMISTRY

ISSN: 2355-7877

e-ISSN: 2355-7931

Journal homepage: <http://journal.ipb.ac.id/index.php/cbj>

Journal E-mail: current.biochemistry@gmail.com

CB Current
Biochemistry

The Efficiency of Melanoidin Based-Waste Degradation with Different Biological Methods

(Efisiensi Degradasi Limbah Berbahaya Dasar Melanoidin dengan Berbagai Metode Biologis)

Hafizh Zahra^{1*}, Ilham Kurniawan¹, Abdurahman Hakim¹

¹Department of Biochemistry, IPB University, Bogor, 16680, Indonesia

Received: 1 November 2020 ; Accepted: 15 December 2020

Corresponding author : Hafizh Zahra; Departemen Biokimia IPB; e-mail: hafizh_zahra@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

Each processing of palm fresh fruit bunches (FFB) into Crude Palm Oil (CPO) will produce solid and liquid waste. One of the forms of liquid waste produced is Palm Oil Mill Effluent (POME). POME waste can cause problems for the environment because it has physical characteristics of dark brown color, high density, rich in organic matter, and bad smell. The POME waste color is thought to come from melanoidin, a biopolymer pigment produced by the Maillard reaction of coconut processing. Apart from melanoidin, phenolic components are detected in POME waste, and this group of compounds is toxic. Several studies have shown that *Lactobacillus plantarum* can reduce the color of POME by 75%. The decolorization process is thought to involve an enzyme as a waste color-changing agent. However, the efficiency associated with these events has not been further investigated. There are three main methods of melanoidin degradation, in that, biological, physicochemical, and enzymatic. This study used the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) approach in creating a short, concise, and clear summary through various references.

Keywords: Bioremediation, Melanoidin, Microbial Degradation

ABSTRAK

Setiap proses pengolahan tandan buah segar (TBS) kelapa sawit menjadi Crude Palm Oil (CPO) akan memproduksi limbah dalam bentuk padat dan cair. Salah satu bentuk limbah cair yang dihasilkan tersebut adalah Palm Oil Mill Effluent (POME). Limbah POME dapat menimbulkan masalah bagi lingkungan karena memiliki ciri fisik berwarna coklat pekat, densitas tinggi, kaya bahan organik, dan berbau busuk. Warna dari limbah POME diduga berasal dari melanoidin, suatu pigmen biopolimer yang dihasilkan oleh reaksi Maillard olahan kelapa. Selain melanoidin, terdapat komponen fenolik yang terdeteksi dalam limbah POME, dimana kelompok senyawa ini bersifat toksik. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa bakteri *Lactobacillus plantarum* dapat mengurangi warna POME sebesar 75%. Proses dekolorisasi tersebut diduga melibatkan enzim sebagai agen pengubah warna limbah. Akan tetapi, efisiensi terkait peristiwa tersebut belum diselidiki lebih lanjut. Terdapat tiga metode utama dalam degradasi melanoidin seperti biologis, fisikokimia, dan enzimatis. Penelitian ini menggunakan metode PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) dalam menciptakan ringkasan yang singkat, padat, dan jelas melalui berbagai referensi.

Keywords: *Bioremediasi, Degradasi Mikrobial, Melanoidin*

1. PENDAHULUAN

Melanoidin adalah senyawa berwarna coklat berstruktur polimer heterogen dengan berat molekul tinggi. Melanoidin terbentuk melalui reaksi Maillard dari kondensasi gula dan asam amino pada suhu tinggi dalam kandungan air yang rendah. Selain gula dan asam amino, terdapat beberapa senyawa yang dapat memengaruhi kepekatan warna melanoidin, diantaranya adalah asam asetat, asam laktat, asam piroglutamat, asam suksinat, dan asam format (Villaño *et al.* 2016). Selain reaksi Maillard, sintesis melanoidin juga terjadi saat proses karamelisasi (Rofiah & Machfudz 2014). Melanoidin hadir dalam berbagai produk seperti roti, kecap, cuka, saus tomat, dan kopi. Golongan senyawa ini sulit terdegradasi jika telah mencemari lingkungan. Degradasi dapat terjadi apabila struktur melanoidin tersebut dimodifikasi oleh mikroba tertentu. Selain itu, melanoidin dapat berdampak pada penghambatan metaloprotease matriks yang berimplikasi pada pertumbuhan dan perkembangan tumor (Villaño *et al.* 2016).

Dampak senyawa melanoidin pada lingkungan dapat memberikan efek yang polutif, khususnya pada wilayah perairan seperti sungai, danau, dan laguna. Beberapa efek yang diberikan diantaranya adalah penurunan kualitas air, bioavailabilitas biota, pemblokiran laju fotosintesis, dan eutrofikasi (Singh *et al.* 2019). Hal tersebut dapat membahayakan flora dan fauna perairan mengingat senyawa ini sukar terdegradasi. Beberapa metode pemulihan polusi melanoidin yang telah diketahui yang diantaranya adalah dengan cara fisikokimia dan biologis (Gonzalo *et al.* 2016). Metode fisikokimia merupakan cara yang konvensional dalam pemulihan polusi melanoidin. Metode tersebut terdiri dari adsorpsi, flokulasi, atau koagulasi serta

menggunakan bahan lain seperti FeCl_3 , AlCl_3 , dan karbon aktif pada metode adsorpsi. Akan tetapi, metode fisiko-kimia diketahui tidak efektif dalam bioremediasi karena senyawa melanoidin dapat mengalami repolimerasi dan memperburuk polusi yang ada (Singh *et al.* 2013). Dengan demikian, fokus penelitian terkini terkait penanggulangan limbah ini beralih ke metode biologis.

2. METODOLOGI

Kajian ini merupakan kajian sistematis dengan menggunakan item pelaporan yang disukai yaitu tinjauan sistematis dan meta-analisis, atau tinjauan sistematis yang disebut PRISMA, yang dilakukan secara sistematis dengan mengikuti prosedur atau protokol penelitian yang benar. Langkah-langkah pelaksanaan tinjauan sistematis telah direncanakan dan diatur dengan matang, sehingga metode ini sangat berbeda dengan metode yang digunakan hanya untuk menyampaikan penelitian pustaka. Proses tinjauan sistematis meliputi beberapa langkah, yaitu 1) penyusunan latar belakang dan tujuan, 2) pertanyaan penelitian, 3) pengambilan dokumen, 4) kriteria pemilihan, 5) penyaringan aktual, 6) *quality checklist*, 6) strategi ekstraksi data, 7) data strategi yang komprehensif. Jumlah penelusuran yang digunakan dalam ringkasan ini adalah sebanyak 36 buah.

3. PEMBAHASAN

Metode Anaerobik dalam Bioremediasi Limbah Melanoidin

Pengolahan limbah secara anaerobik merupakan salah satu proses ekstraksi energi dari komponen limbah tanpa menggunakan oksigen. Pengolahan limbah molase secara anaerobik memiliki keunggulan seperti menghasilkan sedikit lumpur (*sludge*),

membutuhkan lebih sedikit energi, dan menghasilkan biogas yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Salah satu sumber utama melanoidin berasal dari manufaktur penghasil kertas berupa limbah *black liquor*. Limbah ini merupakan produk samping reaksi Kraft ketika pulp kayu diubah menjadi bubur kertas. Reaksi ini mampu menghilangkan lignin, hemiselulosa, dan komponen ekstraktif lainnya untuk membebaskan serat selulosa. Menurut Nure *et al.* (2017), pengolahan secara anaerobik limbah *black liquor* dapat dilakukan dengan sistem *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor* (UASBR) yang membutuhkan waktu 509 hari. Proses-proses awal dari sistem pengolahan limbah ini masih mengandung 100% molase. Setelah beberapa tahapan inkubasi, sebanyak 30% dari *chemical oxygen demand* (COD) SWW mampu terdegradasi dengan baik. Akan tetapi, sistem UASBR tidak dapat melakukan perubahan komposisi media akhir limbah sehingga terjadi penurunan efisiensi penghilangan COD disertai produksi biogas yang tidak stabil. Dengan demikian, UASB tidak efektif digunakan sebagai pilihan remediasi dari untuk limbah *black liquor* (Qin *et al.* 2014).

Limbah kotoran hasil industri peternakan juga dapat menjadi sumber utama melanoidin. Penelitian Mora-Villalobos *et al.* (2020) menunjukkan bahwa pengolahan limbah ternak dengan kandungan gula yang tinggi dapat diremediasi menggunakan sistem *Upflow Anaerobic Fixed Bed* (UAFB). Remediasi dilakukan dengan menginokulasi reaktor dengan kultur anaerobik asal kotoran sapi, kotoran ayam, dan lumpur aktif pada 32-34°C dengan retensi waktu hidrolik selama 20 jam. Hasil menunjukkan bahwa sistem ini dapat menurunkan kadar COD hingga 2000-8000 mg/L, namun belum terbukti efektif jika diterapkan dalam kondisi lingkungan tercemar yang sesungguhnya. Hasil yang berbeda ditunjukkan oleh penelitian Vejchar *et al.* (2019) melalui sistem UAFB yang sama. Hasil

penelitian tersebut menunjukkan penurunan kandungan senyawa organik sebesar 75-93%, namun reaktor terlebih dulu dimodifikasi dengan pelapisan *ring pall* standar dari polypropilen dengan luas permukaan 50 m². Modifikasi tersebut menghasilkan efisiensi yang lebih baik dalam proses penurunan COD dibandingkan dengan reaktor yang dilapisi polietilen dan PVC. Variasi pengaruh waktu retensi hidrolik juga dilakukan selama 5-30 hari dan dievaluasi terhadap *total chemical oxygen demand* (TCOD). Penurunan total TCOD yang terjadi menghasilkan perbedaan sekitar 271-5286 mg/L dan kadar BOD sekitar 66-1212 mg/L jika dibandingkan dengan reaktor standar. Melalui angka tersebut, penghilangan TCOD dan BOD yang terjadi memiliki efisiensi sebesar 54-74%. Selain itu, waktu retensi hidrolik yang paling efektif jatuh pada hari ke 30 dan pengaruhnya pada efisiensi penghilangan TCOD dan BOD mengikuti hubungan eksponensial.

Metode Aerobik dalam Bioremediasi Limbah Melanoidin

Pengolahan air limbah secara anaerobik masih mengandung polutan organik dengan konsentrasi tinggi dan kemudian tidak dapat dibuang secara langsung. Limbah yang diolah sebagian besar masih memiliki BOD, COD, dan padatan tersuspensi yang tinggi. Hal ini dapat mengurangi ketersediaan nutrisi dan mineral esensial melalui proses penjebaran dalam bentuk organik yang tidak dapat berpindah. Selain itu, proses ini juga dapat menghasilkan zat fitotoksik selama dekomposisinya. Oleh karena itu, pengolahan aerobik air limbah molase dapat dilakukan sebagai solusi alternatif penghilangan melanoidin, COD, dan BOD. Pemanfaatan mikroorganisme seperti bakteri (kultur murni dan campuran), sianobakteria, ragi, dan jamur diketahui mampu mendegradasi melanoidin dan penghilangan warna air limbah molase (Zhang *et al.* 2019).

Bioremediasi dengan Bakteri

Banyak bakteri telah dilaporkan memiliki kemampuan dalam menghilangkan warna melanoidin. Bakteri asam laktat (*Lactobacillus coryniformis*, *Lactobacillus sakei*, *Lactobacillus plantarum*, *Weissella soli*, *Pediococcus parvulus*, *Pediococcus pentosaceus*) dapat digunakan untuk menghilangkan warna melanoidin (Omar et al. 2020). Isolat *Lactobacillus plantarum* menunjukkan 75% dekolorisasi melanoidin. Kryzwonos (2011) menggunakan konsorsium dari genus *Bacilli* untuk menghilangkan warna melanoidin. Selain itu, Yadav & Chandra (2012) mengembangkan konsorsium *Proteus mirabilis*, *Bacillus sp.*, *Raoultella planticola* dan *Enterobacter sakazakii* dengan perbandingan 4:3:2:1 yang bertanggung jawab atas 75% dekolorisasi melanoidin dalam 10 hari. Isolat *Alcaligenes faecalis* galur SAG5 menunjukkan 72.6% dekolorisasi melanoidin pada pH optimum 7.5 dan suhu 37°C. Degradasi melanoidin sintetik dan alami dipelajari dengan menggunakan konsorsium aksenik dan campuran bakteri (*Bacillus licheniformis*, *Bacillus sp.* dan *Alcaligenes sp.*) serta menunjukkan konsorsium campuran lebih efektif dibandingkan dengan kultur aksenik dalam menghilangkan warna 73.7% dan 69.8% melanoidin sintesis dan alami. Di sisi lain, kultur aksenik menghilangkan warna masing-masing 65.88%, 62.5% dan 66.1% sintesis dan 52.6%, 48.9% dan 59.6% melanoidin alami (David et al. 2015). Selanjutnya Wilk et al. (2019) mengisolasi *Lactobacillus plantarum* dari sampel acar di Thailand dan menunjukkan hasil dekolorisasi pigmen melanoidin tertinggi sebesar 68.12% dengan larutan MP mengandung glukosa 2%, ekstrak ragi 0.4%, KH_2PO_4 0.1%, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05% dan pH awal 6 dalam kondisi statis pada 30°C dalam waktu 7 hari.

Suryanti et al. (2015) melakukan dekolorisasi air limbah molase menggunakan sel *Pseudomonas fluorescens* dengan efisiensi

dekolorisasi sebesar 76% dalam kondisi tidak steril (empat hari) pada suhu 30 °C. Prakash et al. (2014) mempelajari degradasi air limbah penyulingan secara anaerob oleh tiga galur bakteri, yaitu *Xanthomonas fragariae*, *Bacillus megaterium* dan *Bacillus cereus* dan penghilangan COD meningkat dengan waktu hingga 48 jam. Penghilangan COD maksimum dan efisiensi penghilangan warna bervariasi dari 66-81% dan 65-75% untuk galur tersebut. Galur *Bacillus cereus* menunjukkan efisiensi maksimum penghilangan COD (81%) dan warna (75%) dari ketiga galur. Zhang et al. (2020) kemudian mempelajari lebih lanjut skrining anaerob fakultatif pembentuk asam untuk kemampuan penghilangan warna mereka dengan air limbah sulingan yang dihasilkan selama fermentasi alkohol dari tetes tebu. Sebanyak 113 galur yang diisolasi dari menunjukkan aktivitas penghilangan warna pada media GYP termodifikasi yang mengandung 10% (v/v) air limbah suling. Galur SM-3 menghilangkan warna 31.4% pigmen molase pada konsentrasi 10% (v/v) air limbah suling yang ditambah dengan glukosa 1% dalam waktu lima hari. Galur tersebut diidentifikasi sebagai kultur bakteri *Lactobacillus casei*. Sa'diyah et al. (2019) melakukan seleksi berbagai mikroorganisme yang memiliki kemampuan menghilangkan warna air limbah molase dalam kondisi termofilik dan anaerobik. Galur MD-32 dipilih sebagai galur terbaik dan termasuk genus *Bacillus* yang mirip dengan *B. smithii*. Galur tersebut dapat menghilangkan warna limbah 35.5% pigmen molase dalam waktu 20 hari pada suhu 55 °C.

Bioremediasi dengan Fungi

Aktivitas dekolorasi oleh mikroba telah banyak diteliti pada limbah molase. Salah satu fungi yang diketahui mampu mendegradasi dan dekolorasi limbah cairan adalah keluarga *Aspergillus* seperti *Aspergillus fumigatus* G26, *Aspergillus niger*, *Aspergillus niveus*. Spesies

Aspergillus fumigatus UB260 mampu menghilangkan 69-75% zat warna melanoidin serta mengurangi COD sebanyak 70-90%. *Rhizoctonia sp.* 90 mampu mendekolorasi medium melanoidin molase dan medium melanoidin sintetik sebanyak 87.5% dan 84.5% secara berurutan (Hwang *et al.* 2011). Selain itu, *Aspergillus awamori* var. kawachi juga telah banyak digunakan untuk produksi protein sel tunggal dari limbah perairan Jepang setelah kultivasi aerobik (Vítězová *et al.* 2020). Jamur pelapuk putih juga diketahui dapat menghilangkan warna melanoidin yang terkandung dalam limbah air (Chuppa-Tostain *et al.* 2020). *Phanerochaete chrysosporium* mampu menghilangkan warna dan total fenol dari efluen pemurnian gula. Beberapa faktor yang diduga mempengaruhi aktivitas deolorasi meliputi konsentrasi nutrien, pH, dan sumber karbon. Penambahan $MgSO_4$, KH_2PO_4 , NH_4NO_3 , dan sumber karbon dapat memaksimalkan eliminasi warna sebesar 69%.

Fungi jenis lain, *Coriolus* No.20 yang tergabung dalam kelas basidiomiset, dapat menghilangkan zat warna pada limbah air molase sebanyak 82.5% dalam kondisi optimal. Dekolorasi ini terjadi melalui penyerapan melanoidin ke dalam miselium. Galur ini, dalam sistem *fed-batch*, mampu menghilangkan warna sebanyak 75%. Dekolorasi oleh fungi juga dapat dibantu oleh enzim mangan peroksidase (MnP) dan mangan-independen peroksidase (MIP). Kedua enzim ini menunjukkan adanya aktivitas deolorasi terhadap melanoidin jika terdapat H_2O_2 . Miyata *et al.* (2000) memanfaatkan jamur pelapuk putih tipe *Coriolous hirsutus* yang menunjukkan adanya kemampuan deolorasi melanoidin dalam kultur yang tidak diberi tambahan nutrien nitrogen. Penambahan pepton pada kultur mengurangi kemampuan fungi untuk mendekolorasi melanoidin, namun nitrogen anorganik, contohnya ammonium dan nitrat, tidak mengurangi kemampuan deolorasi fungi tersebut. Isolat

Phanerochaete chrysosporium JAG-40 dari sampel tanah yang jenuh dengan limbah molase mampu mendekolorasi melanoidin alami dan sintetik sebanyak 80% selama 6 hari pada suhu 30°C dalam kondisi aerobik (Vejchar *et al.* 2019). Kromatografi filtrasi gel menunjukkan bahwa melanoidin dengan bobot molekul lebih besar akan didekolorasi lebih cepat dibandingkan fraksi melanoidin dengan bobot molekul kecil.

Brunner *et al.* (2018) melaporkan bahwa *Flavodon flavus*, spesies basidiomiset yang diisolasi dari habitat perairan, mampu menghilangkan warna kecoklatan yang tinggi pada molase. Aktivitas deolorasi dari fungi ini diduga dapat ditingkatkan dengan cara imobilisasi dalam busa poliuretan. Aktivitas deolorasi juga ada pada media yang ditambahkan air laut, media rendah nitrogen, media kaya nutrient, dan media bagas tebu. España-Gamboa (2017) mengisolasi dua galur fungi, yaitu *Penicillium pinophilum* TERI DB1 dan *Alternaria gaisen* TERI DB6 yang mengandung enzim ligninolitik dan berpotensi mendekolorasi efluen yang terkontaminasi. Adapun enzim yang terkandung dalam fungi ini meliputi lakase, mangan-dependen peroksidase, dan lignin peroksidase. Studi lain menunjukkan *Trichoderma viride* dapat menghilangkan warna sebanyak 53.5% ketika dikultivasi selama 7 hari pada suhu 30°C. Dekolorasi dapat meningkat dengan adanya penambahan pepton dan ekstrak khamir pada media produksi. Penurunan pH dibawah 5 setelah inkubasi juga diketahui dapat meningkatkan aktivitas deolorasi. Meski terlihat adanya korelasi antara gula pereduksi dan penurunan intensitas warna, namun pengaruh penggunaan enzim pada aktivitas deolorasi belum diketahui.

Metode Enzimatis dalam Bioremediasi Limbah Melanoidin

Bioremediasi enzimatik berada diantara proses perawatan fisikokimia dan biologis.

Bioremediasi enzimatik memiliki keunggulan teknologi dan membutuhkan pertimbangan ekonomis untuk mengaplikasikannya dalam skala besar. Proses ini memiliki beberapa keunggulan potensial dibandingkan pengobatan konvensional seperti dapat diterapkan pada senyawa biorefraktori, dapat dilakukan baik pada konsentrasi kontaminan tinggi atau rendah, dapat diaplikasikan pada berbagai pH, suhu, dan salinitas (Echavarría *et al.* 2012). Penelitian terkini berfokus pada pengembangan proses enzimatik untuk pengolahan limbah cair sebagai pengakuan atas potensi proses ini (Arimi *et al.* 2015). Sejumlah besar enzim (peroksidase, oksidoreduktase, enzim selulolitik sianidase, protease, dan amilase) dari berbagai sumber telah dilaporkan berperan penting dalam berbagai aplikasi pengolahan limbah.

Prabhakar *et al.* (2015) memperoleh dekolorisasi maksimum sekitar 60% pada hari ke-8 setelah inokulasi dengan jamur *Trametes sp.* Penelitian tersebut menunjukkan bahwa efluen yang ditambahkan pada konsentrasi akhir 20% (v/v) setelah lima hari pertumbuhan jamur memiliki aktivitas lakase tertinggi dalam miselium ekstraseluler. Basidiomisetes jenis *T. versicolor* juga mampu mengurai asam humat dan turunannya serta melanoidin. Sebuah protein ekstraseluler sebesar 47 kDa hasil isolasi Rawel *et al.* 2019 dari *T. versicolor* yang belum diidentifikasi hingga saat ini dapat memineralisasi melanoidin. Proses tersebut dapat dikaitkan erat dengan metabolisme fungi yang ada. Sistem enzim yang bergantung pada Mn^{2+} ini membutuhkan oksigen dan digambarkan sebagai peroksidase. Beberapa penelitian telah mengidentifikasi enzim terkait degradasi lignin yang berpartisipasi dalam dekolorisasi melanoidin (Georgiou *et al.* 2016).

Glukosa oksidase penghasil H_2O_2 intraseluler telah diisolasi dari galur *Coriolus*. Selain itu, *C. hirsutus* telah dilaporkan menghasilkan enzim yang mengkatalisis

dekolorisasi melanoidin secara langsung tanpa penambahan gula dan O_2 (Kong 2016). Miyata *et al.* (2000) menggunakan pelet *C. hirsutus* untuk menghilangkan warna media yang mengandung melanoidin. Telah dijelaskan bahwa H_2O_2 ekstraseluler dan dua peroksidase ekstraseluler, mangan-independen peroksidase (MIP) dan mangan peroksidase (MnP) terlibat dalam aktivitas dekolorisasi (Dedeles *et al.* 2010). Gupta *et al.* (2011) menyelidiki peroksidase penghilang warna dengan membudidayakan *Candida sp.* menggunakan molase sebagai sumber karbon. Komponen dalam medium molase merangsang produksi peroksidase penghilang warna, namun menghambat aktivitas penghilangan warna dari enzim yang dimurnikan (Vrsanska 2016). Dekolorisasi enzimatik dari media molase juga telah menggunakan *P. chrysosporium* BW808 (Saoji & Khan 2015). Dalam kondisi stasioner, tidak ada galur yang dapat menghilangkan warna molase atau menghasilkan enzim lignin peroksidase, mangan peroksidase, dan lakase (Kumar & Chandra 2018). Akan tetapi, semua galur baru dapat menghasilkan lignin peroksidase dan mangan peroksidase bila dibudidayakan dalam botol kaca beralas datar dalam kondisi budidaya stasioner.

Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan minat di bidang bioremediasi melanoidin menggunakan mikroba telah meningkat. Beberapa mikroorganisme seperti bakteri dan jamur menunjukkan kemampuan yang baik dalam menghilangkan warna limbah industri penyulingan berbasis melanoidin. Dengan demikian, pemahaman yang lebih baik tentang aktivitas mikroba yang bertanggung jawab atas degradasi melanoidin akan berkontribusi untuk meningkatkan efisiensi sistem bioremediasi limbah secara keseluruhan. Selain itu, adalah penting untuk mengetahui produk akhir dari bioremediasi melanoidin. Perbaikan genetik isolat dapat dieksplorasi di masa depan untuk meningkatkan efisiensi penghilangan warna

mereka. Upaya penelitian yang lebih maju secara teknis diperlukan untuk mencari, mengeksplorasi spesies bakteri baru, dan meningkatkan aplikasi praktis untuk menyebarkan penggunaan bakteri untuk bioremediasi limbah industri. Studi enzimatik akan digunakan untuk memahami mekanisme degradasi melanoidin di prospek masa depan. Terakhir, bioremediasi mikroba yang melibatkan kombinasi ahli mikrobiologi, ahli bioteknologi, ahli kimia, dan insinyur sangat ideal untuk menutupi kesenjangan yang semakin lebar antara disiplin ilmu yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Arimi MM, Zhang Y, Götz G, Geißen SU. 2015. Treatment of melanoidin wastewater by anaerobic digestion and coagulation. *Environmental Technology*. 36(19): 2410-2418.
- Brunner I, Fischer M, Rüthi J, Stierli B, Frey B. 2018. Ability of fungi isolated from plastic debris floating in the shoreline of a lake to degrade plastics. *PloS one*. 13(8): 1-14.
- Chuppa-Tostain G, Tan M, Adelard L, Shum-Cheong-Sing A, François JM, Caro Y, Petit T. 2020. Evaluation of filamentous fungi and yeasts for the biodegradation of sugarcane distillery wastewater. *Microorganisms*. 8(10): 1-16.
- David C, Arivazhagan M, Balamurali MN, Shanmugarajan D. 2015. Decolorization of distillery spent wash using biopolymer synthesized by *Pseudomonas aeruginosa* isolated from tannery effluent. *BioMed Research International*. 1(2015): 1-10.
- Dedeles GR, Cordero PR, Tanaka M, Asano K. 2010. Color reduction of molasses-based distillery slop by crude manganese peroxidase from *Ganoderma lucidum*. *Asia Life Sciences-The Asian International Journal of Life Sciences*. 19(2): 215-227.
- Echavarría AP, Pagán J, Ibarz A. 2012. Melanoidins formed by Maillard reaction in food and their biological activity. *Food Engineering Reviews*. 4(4): 203-223.
- España-Gamboa E, Vicent T, Font X, Dominguez-Maldonado J, Canto-Canché B, Alzate-Gaviria L. 2017. Pretreatment of vinasse from the sugar refinery industry under non-sterile conditions by *Trametes versicolor* in a fluidized bed bioreactor and its effect when coupled to an UASB reactor. *Journal of Biological Engineering*. 11(1): 1-11.
- Georgiou RP, Tsiakiri EP, Lazaridis NK, Pantazaki AA. 2016. Decolorization of melanoidins from simulated and industrial molasses effluents by immobilized laccase. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 4(1): 1322-1331.
- Gonzalo G, Colpa DI, Habib MH, Fraaije MW. 2016. Bacterial enzymes involved in lignin degradation. *J Biotechnol*. 20(236): 110-119.
- Gupta M, Mishra PK, Kumar A, Tiwari S. 2011. Decolorization of molasses melanoidin by *Candida* Sp. *Indian Journal of Applied and Pure Biology*. 26(2): 199-204.
- Hwang CF, Jiang YS, Sheu SC, Hsieh PC, Guo JH. 2011. Purification and characterization of a novel glucose oxidase-like melanoidin decolorizing enzyme from *Geotrichum* sp. No. 56. *African Journal of Microbiology Research*. (20): 3256-3266.
- Kong W, Chen H, Lyu S, Ma F, Yu H, Zhang X. 2016. Characterization of a novel manganese peroxidase from white-rot fungus *Echinodontium taxodii* 2538, and its use for the degradation of lignin-related compounds. *Process Biochemistry*. 51(11): 1776-1783.
- Kryzwonos M. 2011. Decolorization of sugar beet distillery effluent using mixed cultures of bacteria of the genus *Bacillus*.

- African Journal of Biotechnology*. 11(14): 3464-3475.
- Kumar V, Chandra R. 2018. Characterisation of manganese peroxidase and laccase producing bacteria capable for degradation of sucrose glutamic acid-Maillard reaction products at different nutritional and environmental conditions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 34(2): 1-18.
- Miyata N, Mori T, Iwahori K, Fujita M. 2000. Microbial decolorization of melanoidin containing wastewaters: combined use of activated sludge and the fungus *Coriolus hirsutus*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 89(2):145-150.
- Mora-Villalobos JA, Montero-Zamora J, Barboza N, Rojas-Garbanzo C, Usaga J, Redondo-Solano M, Schroedter L, Olszewska-Widdrat A, López-Gómez JP. 2020. Multi-product lactic acid bacteria fermentations: A review. *Fermentation*. 6(1): 1-21.
- Nure JF, Shibeshi NT, Asfaw SL, Audenaert W, Van Hulle SW. 2017. COD and colour removal from molasses spent wash using activated carbon produced from bagasse fly ash of Matahara sugar factory, Oromiya region, Ethiopia. *Water SA*. 43(3): 470-479.
- Omar AA, Mahgoub S, Salama A, Likotrafiti E, Rhoades J, Christakis C, Samaras P. 2020. Evaluation of *Lactobacillus kefir* and manganese peroxidase producing-bacteria for decolorization of melanoidins and reduction of chemical oxygen demand. *Water and Environment Journal*.
- Prabhakar S, Kandeepan C, Sivamani P. 2015. Analysis on Various Enzymes involved in Biodegradation of Lignocellulose by Fungal Isolates from Wood and Soil. *International Journal of Recent Scientific Research*. 5(11): 2053-2057.
- Prakash NB, Sockan V, Raju VS. 2014. Anaerobic digestion of distillery spent wash. *ARPN Journal of Science and Technology*. 4(3): 134-140.
- Qin X, Zhang J, Zhang X, Yang Y. 2014. Induction, purification and characterization of a novel manganese peroxidase from *Irpex lacteus* CD2 and its application in the decolorization of different types of dye. *PLoS One*. 9(11): 1-13.
- Rawel HM, Huschek G, Sagu ST, Homann T. 2019. Cocoa bean proteins—Characterization, changes and modifications due to ripening and post-harvest processing. *Nutrients*. 2019 Feb;11(2): 1-20.
- Rofiah A, Machfudz A. 2014. Kajian dosis sukrosa dan sirup glukosa terhadap kualitas permen karamel susu. *Nabatia*. 11(1) 55-65.
- Sa'diyah L, Lestari KA. 2019. Pengaruh variasi pH terhadap kemampuan bakteri dalam dekolorisasi limbah cair gula rafinasi. *Pijar MIPA*. 14(1): 73-76.
- Santal AR, Singh N. 2013. Biodegradation of Melanoidin from Distillery Effluent: Role of Microbes and Their Potential Enzymes.
- Saoji SA, Khan Z. 2015. Enzymatic clarification and fading of synthetic and real melanoidins by laccase and peroxidases in submerged fermentation by *Phanerochaete chrysosporium* BW808 (MTCC 787). *Arch Appl Sci Res*. 2015(70): 59-67.
- Singh R, Singh TA, Singh T, Gaur R, Pandey PK, Jamal F, Bansal S, Pandey LK, Sarsaiya S, Nagpure J, Mishra S. 2019. Origin and Remediation of Melanoidin Contamination in Water Sources. *Int J Curr Microbiol App Sci* 8(2): 1399-1415.
- Singh TA, Singh T, Singh R, Pandey PK, Gaur R, Jamal F, Patel SK, Bansal S. 2013. Bioremediation of melanoidin contamination in distillery effluent using *Aspergillus brasiliensis*. *Biotechnologia*. 101.3(2020): 205-213.

- Suryanti V, Marliyana SD, Wulandari A. 2015. Biosurfactant production by *Pseudomonas fluorescens* growing on molasses and its application in phenol degradation. *InAIP Conference Proceedings*. 1699(1):1-7.
- Vejchar D, Vacek J, Hájek D, Bradna J, Kasal P, Svobodová A. 2019. Reduction of surface runoff on sloped agricultural land in potato cultivation in de-stoned soil. *Plant, Soil and Environment*. 65(3): 118-124.
- Villaño D, García-Viguera C, Mena P. 2016. Colors: health effects. *Encyclopedia of Food and Health*. 265-272.
- Vítězová M, Kohoutová A, Vítěz T, Hanišáková N, Kushkevych I. 2020. Methanogenic microorganisms in industrial wastewater anaerobic treatment. *Processes*. 8(12): 1-27.
- Vrsanska M, Voberkova S, Langer V, Palovcikova D, Moulick A, Adam V, Kopel P. 2016. Induction of laccase, lignin peroxidase and manganese peroxidase activities in white-rot fungi using copper complexes. *Molecules*. 21(11): 1-15.
- Wilk M, Krzywonos M, Borowiak D, Seruga P. 2019. Decolourization of sugar beet molasses vinasse by lactic acid bacteria-the effect of yeast extract dosage. *Polish Journal of Environmental Studies*. 28(1): 385-392.
- Yadav S, Chandra R. 2012. Biodegradation of organic compounds of Molasses Melanoidin (MM) from Biomethanated Distillery Spent Wash (BMDS) during the decolorization by a potential bacterial consortium. *Biodegradation*. 1(1): 23-609.
- Zhang W, Lin Z, Pang S, Bhatt P, Chen S. 2020. Insights into the biodegradation of lindane (γ -hexachlorocyclohexane) using a microbial system. *Frontiers in Microbiology*. 11(522): 1-22.
- Zhang Z, Li D, Zhang X. 2019. Enzymatic decolorization of melanoidins from molasses wastewater by immobilized keratinase. *Bioresource Technology*. 1(280): 165-172.