

Potensi Rekayasa Genetik *Aspergillus Terreus* dalam Optimalisasi Enzim Pengurai Plastik: Literatur Review

Asmayani¹ & Yusminah Hala²

Universitas Negeri Makassar^{1,2}

asmayani@upri.ac.id¹, yushala@unm.ac.id²

Corresponding Author: Asmayani, E-mail: asmayani@upri.ac.id

ABSTRACT

Produksi dan pembuangan plastik global yang terus meningkat menimbulkan akumulasi limbah plastik rekalsitrasi seperti PE, PP, dan PET di lingkungan, sehingga diperlukan solusi biodegradasi yang lebih berkelanjutan berbasis mikroorganisme. *Aspergillus terreus* merupakan jamur filamentosa yang diketahui mampu mendegradasi berbagai polimer sintetis (LDPE, HDPE, PP) melalui sekresi enzim oksidatif dan hidrolitik, dengan efisiensi penurunan massa dilaporkan berkisar 7–30% bergantung jenis plastik, pra-perlakuan, dan kondisi kultur. Penelitian ini merupakan kajian literatur sistematis yang menganalisis artikel ilmiah tahun 2000–2025 dari basis data Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, dan Google Scholar mengenai (1) kemampuan *A. terreus* dalam biodegradasi plastik, (2) enzim kunci yang terlibat, dan (3) potensi rekayasa genetik untuk mengoptimalkan enzim pengurai plastik. Hasil telaah menunjukkan bahwa laccase dan peroksidase berperan sebagai inisiator oksidasi pada poliolefin (PE/PP), sedangkan untuk poliester seperti PET, *A. terreus* lebih prospektif dimanfaatkan sebagai host ekspresi bagi cutinase/PET-hydrolase heterolog. Perkembangan teknologi CRISPR/Cas9, promotor konstitutif kuat (misalnya P_{gpdA}), sistem seleksi pyrG, serta strain $\Delta ku70$ pada *A. terreus* membuka peluang rekayasa multi-gen untuk meng-overekspresikan enzim endogen maupun memasukkan gen enzim pengurai plastik dari mikroba lain. Meski demikian, masih terdapat tantangan terkait bottleneck jalur sekresi, over-glikosilasi, dan degradasi proteolitik sehingga diperlukan rekayasa sistemik dan validasi skala bioreaktor sebelum *A. terreus* dapat diimplementasikan sebagai platform bioindustri pengelolaan limbah plastik.

KEYWORDS

Aspergillus terreus, biodegradasi plastik, enzim pengurai plastik, rekayasa genetik, CRISPR/Cas9

ARTICLE DOI:

<https://doi.org/10.53696/venn.v5i4.375>

A. Pendahuluan

Plastik telah menjadi salah satu material paling melimpah dan serbaguna yang dihasilkan manusia, digunakan hampir di semua sektor mulai dari kemasan, tekstil, konstruksi, otomotif hingga elektronik karena sifatnya yang ringan, kuat, dan murah (Ritchie et al., 2023). Secara kimia, sebagian besar plastik modern adalah polimer sintetis organik yang tersusun terutama atas atom karbon dan hidrogen, kadang disertai unsur lain seperti oksigen, klorin, dan nitrogen, dan umumnya diproduksi dari sumber fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam (Geyer et al., 2017a). Produksi plastik global terus meningkat tajam; analisis terbaru menunjukkan bahwa produksi tahunan telah mencapai sekitar 460 juta ton dan diproyeksikan hampir tiga kali lipat pada 2060 jika tidak ada intervensi serius (UNEP, 2025). Kondisi ini menjadikan plastik khususnya plastik sintetis non-biodegradable sebagai sumber masalah lingkungan global yang mendesak.

Masalah utama muncul karena jenis plastik yang paling banyak digunakan, seperti polietilena (PE), polipropilena (PP), polietilena tereftalat (PET), polivinil klorida (PVC), polistirena (PS), dan poliuretan (PUR), didesain sangat stabil dan tahan terhadap degradasi alami (Mohan et al., 2020). Studi global menunjukkan bahwa dari sekitar 8.300 juta ton plastik virgin yang diproduksi hingga 2015, hanya 9% yang didaur ulang, 12% dibakar, dan 79% berakhir di TPA atau lingkungan alami (Geyer et al., 2017). Akibatnya, limbah plastik terakumulasi di darat, sungai, dan lautan; pada 2019 diperkirakan sekitar 20 juta ton plastik bocor ke lingkungan setiap tahun, dan akumulasi sampah plastik di laut telah mencapai puluhan juta ton (Dueñas-Moreno et al., 2023). Akumulasi ini berkontribusi terhadap polusi udara, air, dan tanah, mengancam keanekaragaman hayati, serta

menimbulkan risiko kesehatan manusia melalui paparan mikroplastik dan bahan kimia aditif yang bersifat toksik ([Dueñas-Moreno et al., 2023](#)).

Penyebab mendasar dari masalah ini bersifat struktural, ketergantungan kuat pada plastik berbasis fosil yang tahan lama, infrastruktur pengelolaan limbah dan sistem daur ulang yang belum memadai, serta degradasi alami plastik yang sangat lambat karena struktur polimer berantai panjang, berat molekul tinggi, dan sifat hidrofobik ([Mohanan et al., 2020](#)). Beberapa jenis plastik diperkirakan membutuhkan ratusan hingga ribuan tahun untuk terdegradasi sepenuhnya di lingkungan, sehingga setiap ton plastik yang diproduksi hari ini berpotensi tetap ada selama beberapa generasi ([Mohanan et al., 2020](#)). Pada saat yang sama, banyak negara, khususnya negara berkembang, tidak memiliki kapasitas teknis dan fasilitas yang cukup untuk mengelola aliran produk dan limbah plastik dalam skala besar, sehingga beban polusi sering kali jatuh pada komunitas lokal yang rentan ([Dueñas-Moreno et al., 2023](#)).

Berbagai solusi teknis telah dikembangkan untuk menangani limbah plastik, termasuk fotodegradasi, oksidasi kimia, pirolisis dan proses termal, serta iradiasi, namun sebagian besar metode ini membutuhkan energi tinggi, biaya besar, dan berpotensi menghasilkan produk samping beracun yang menimbulkan masalah lingkungan baru ([Getino et al., 2025](#)). Dalam beberapa tahun terakhir, biodegradasi berbasis mikroorganisme (bakteri, jamur, aktinomisetes) dipandang sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan karena bergantung pada aktivitas enzimatis untuk memutus ikatan polimer, sehingga berpotensi menurunkan jejak energi dan emisi. Namun, kajian terkini menegaskan bahwa secara alami biodegradasi plastik oleh mikroorganisme umumnya sangat lambat dan efisiensi degradasinya masih rendah untuk banyak jenis plastik rekalsitran seperti PE dan PET, sehingga perlu strategi optimasi yang lebih canggih ([Mohanan et al., 2020](#)).

Di antara kelompok mikroorganisme, jamur filamentosa menonjol karena kemampuan mereka menghasilkan beragam enzim oksidatif dan hidrolitik (misalnya laccase, peroksidase, cutinase, dan esterase) yang mampu menyerang struktur polimer plastik ([Ekanayaka et al., 2022](#)). Review terbaru tentang jamur perusak plastik menunjukkan bahwa lebih dari 400 spesies mikroba, termasuk banyak taksa jamur, telah dilaporkan mampu mendegradasi berbagai plastik sintetis, dan jamur dari genus *Aspergillus* merupakan salah satu kelompok yang paling sering ditemukan berasosiasi dengan permukaan plastik di lingkungan ([Ekanayaka et al., 2022](#)). Beberapa studi eksperimental melaporkan bahwa *Aspergillus niger* dan *Aspergillus terreus* mampu meningkatkan laju degradasi polietilena densitas rendah (LDPE) dan plastik lainnya dalam kondisi laboratorium, meskipun persentase degradasinya masih relatif moderat ([Ogunbayo et al., 2019](#)). Temuan-temuan ini menunjukkan bahwa jamur memiliki potensi sebagai “biokatalis hidup”, tetapi perlu ditingkatkan kinerjanya untuk aplikasi pengelolaan limbah plastik dalam skala besar.

Aspergillus terreus sendiri merupakan jamur filamentosa yang sudah lama dimanfaatkan secara industri, terutama sebagai penghasil lovastatin dan berbagai metabolit sekunder lainnya, sehingga sistem budidaya dan optimasi produksinya telah dikembangkan dengan baik ([Mulder et al., 2015](#)). Perkembangan teknologi rekayasa genetik pada jamur, termasuk penerapan sistem CRISPR/Cas9 untuk modifikasi genom *A. terreus*, membuka peluang untuk mengatur ekspresi gen, meningkatkan sekresi enzim, dan merancang ulang jalur metabolik sesuai kebutuhan bioteknologi ([Shih et al., 2022](#)). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengeditan genom *A. terreus* dapat meningkatkan produksi senyawa target secara signifikan, yang secara prinsip juga dapat diterapkan untuk mengoptimalkan produksi enzim pengurai plastik seperti laccase, cutinase-like enzyme, atau esterase yang relevan dengan degradasi polimer tertentu (misalnya PE, PP, PET) ([Shih et al., 2022](#)).

Meskipun demikian, hingga saat ini masih terdapat kesenjangan pengetahuan karena belum banyak kajian sistematis yang secara khusus mengintegrasikan bukti kemampuan *A. terreus* dalam

biodegradasi plastik dengan potensi teknis rekayasa genetiknya ([Ekanayaka et al., 2022](#)). Hal ini menimbulkan pertanyaan penting: enzim dan jalur metabolik mana yang paling prospektif untuk ditingkatkan pada *A. terreus* untuk menarget plastik tertentu (misalnya PE/PP vs PET), serta strategi rekayasa apa yang paling efektif untuk mengoptimalkan ekspresi dan sekresinya. Dengan latar belakang tersebut, penelitian berjudul “Potensi Rekayasa Genetik *Aspergillus terreus* dalam Optimalisasi Enzim Pengurai Plastik” diposisikan sebagai upaya untuk menjawab kebutuhan solusi yang lebih ramah lingkungan dan berbasis bioteknologi, melalui eksplorasi terarah terhadap kombinasi antara kemampuan alami jamur perusak plastik dan kekuatan rekayasa genetik modern ([Shih et al., 2022](#)).

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur sistematis (*systematic literature review*) dengan sintesis naratif. Kajian difokuskan untuk menelusuri dan menganalisis literatur ilmiah mengenai (1) kemampuan *Aspergillus terreus* dalam biodegradasi plastik, (2) jenis enzim kunci yang berperan dalam proses tersebut, serta (3) potensi penerapan rekayasa genetik dalam mengoptimalkan ekspresi dan sekresi enzim pengurai plastik.

Pencarian literatur dilakukan pada basis data ilmiah internasional seperti Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, dan Google Scholar, menggunakan kombinasi kata kunci “*Aspergillus terreus*”, “*plastic degradation*”, “*biodegradation*”, “*laccase*”, “*cutinase*”, dan “*genetic engineering*”. Artikel yang disertakan memenuhi kriteria yang diterbitkan antara tahun 2000-2025, berbahasa Inggris atau Indonesia, berisi data empiris atau kajian konseptual yang relevan dengan biodegradasi plastik dan rekayasa genetik *A. terreus*. Artikel non-ilmiah, editorial, serta publikasi tanpa teks lengkap dikeluarkan dari analisis.

Literatur yang memenuhi kriteria kemudian dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi pola dan hubungan antara kemampuan biologis *A. terreus*, karakteristik enzim yang dihasilkannya, serta pendekatan rekayasa genetik yang telah atau berpotensi diterapkan. Hasil sintesis disajikan dalam bentuk narasi ilmiah yang menyoroti arah penelitian terkini, kesenjangan pengetahuan (*research gap*), dan prospek pengembangan bioteknologi pengurai plastik berbasis jamur filamentosa ini.

C. Hasil dan Pembahasan Penelitian

1. *Aspergillus terreus*

Aspergillus terreus merupakan jamur berfilamen yang termasuk dalam genus *Aspergillus*, subgenus *Circumdati*, section *Terrei*, dan dikenal luas sebagai jamur saprofit tanah yang tersebar di berbagai ekosistem darat, seperti tanah pertanian, tanah hutan, kompos, serta rhizosfer tanaman. Sebagai dekomposer, *A. terreus* berperan dalam penguraian bahan organik sehingga berkontribusi terhadap siklus nutrisi di lingkungan. Secara umum, jamur ini digolongkan ke dalam kelas Eurotiomycetes dan famili Trichocomaceae, bersama dengan berbagai spesies *Aspergillus* lain yang juga berperan penting secara ekologis maupun industri.

Secara morfologi, *A. terreus* membentuk koloni berwarna krem hingga coklat keemasan pada media kultur, dengan konidiofor berujung vesikel yang menghasilkan kepala konidia berbentuk kolumnar (bertiang) yang khas. Hifa bersifat bersepta dan hialin, sedangkan konidia umumnya berukuran kecil, halus hingga sedikit kasar, dan mudah tersebar melalui udara. Karakter-karakter ini, bersama dengan ciri mikroskopis lain, digunakan sebagai dasar identifikasi dan pembedaan *A. terreus* dari spesies *Aspergillus* lain dalam section *Terrei* ([Vassileva et al., 2020](#)).

Selain perannya di alam, *A. terreus* juga dikenal sebagai produsen berbagai metabolit sekunder bernilai tinggi. Berbagai penelitian melaporkan bahwa spesies ini mampu menghasilkan asam itakonat, lovastatin, terrein, dan sejumlah senyawa bioaktif lain yang memiliki aktivitas antimikroba, antikanker, maupun antiinflamasi, sehingga banyak dimanfaatkan dalam bidang bioteknologi dan farmasi ([Vassileva et al., 2020](#)).

Di sisi lain, beberapa strain *A. terreus* juga tercatat sebagai patogen oportunistik pada manusia, terutama pada individu imunokompromais, sehingga spesies ini memiliki dimensi ekologis dan klinis sekaligus ([Chigwada et al., 2025](#)).

Dalam dua dekade terakhir, *A. terreus* mulai banyak dilaporkan sebagai salah satu jamur pendegradasi plastik. Kajian sintesis yang dilakukan [Ekanayaka et al. \(2022\)](#) menyebutkan *A. terreus* di antara taksa jamur yang mampu mendegradasi berbagai polimer sintesis seperti low-density polyethylene (LDPE), high-density polyethylene (HDPE), poliuretan, dan jenis polietilena lain, terutama dari isolat yang berasal dari tanah, TPA (landfill), serta lingkungan pesisir. Hal ini menunjukkan bahwa selain berperan sebagai dekomposer bahan organik alami, *A. terreus* juga berpotensi terlibat dalam perombakan polimer sintesis yang secara alami sangat resisten terhadap degradasi.

Penelitian eksperimental memperkuat peran *A. terreus* sebagai pengurai plastik. Sáenz et al. 2019 menunjukkan bahwa *A. terreus* dan *A. niger* yang diisolasi dari ekosistem mangrove mampu mendegradasi LDPE dalam kondisi media minimal, dengan penurunan berat plastik setelah masa inkubasi tertentu, yang mengindikasikan pemanfaatan LDPE sebagai salah satu sumber karbon. Studi lain oleh [Samat et al. \(2023\)](#) melaporkan bahwa *A. terreus* (strain ATCC 20542) mampu menyebabkan biodeteriorasi yang signifikan pada polipropilena (PP) yang telah diberi pra-perlakuan (UV, panas, atau Fenton), dengan perubahan berat dan sifat fisik PP granula maupun film. Temuan ini menegaskan bahwa *A. terreus* berpotensi digunakan untuk menangani jenis plastik “hard-to-recycle” seperti PP.

Lebih jauh, studi pemantauan dan skrining jamur pendegradasi plastik di berbagai habitat juga menemukan *A. terreus* dari sedimen saltern dan lingkungan lain yang tercemar plastik, yang kemudian menunjukkan aktivitas degradasi terhadap polimer tertentu dalam uji laboratorium ([Černoša et al., 2024](#)). Secara keseluruhan, kombinasi data taksonomi, ekologi, dan hasil uji biodegradasi plastik menempatkan *A. terreus* sebagai salah satu spesies kunci dalam kelompok jamur pendegradasi plastik. Namun demikian, mekanisme molekuler dan enzimatis yang terlibat, serta optimasi kondisi lingkungan untuk meningkatkan efisiensi biodegradasi, masih membutuhkan kajian lebih lanjut, sehingga membuka peluang penelitian lanjutan terkait pemanfaatan *A. terreus* dalam bioremediasi dan pengelolaan sampah plastik secara ramah lingkungan.

2. **Bukti Biodegradasi oleh *A. terreus***

Untuk memberikan gambaran empiris mengenai kemampuan *Aspergillus terreus* dalam mendegradasi berbagai jenis polimer sintesis, berikut disajikan rangkuman hasil penelitian terdahulu yang memuat jenis plastik, sumber isolat, kondisi eksperimen, serta parameter dan hasil degradasi yang dilaporkan.

TABEL 1. Bukti Kemampuan *Aspergillus terreus* dalam Biodegradasi Plastik

No	Jenis Polimer	Sumber Isolat / Lingkungan	Kondisi Eksperimen	Lama Inkubasi	Pre treatment	Metrik Degradasi	Hasil / Temuan Utama	Referensi
1	LDPE (Low-Density Polyethylene)	<i>A. terreus</i> dari ekosistem mangrove	Media mineral dengan sukrosa sebagai karbon tambahan	90 hari	Tidak ada	Penurunan berat, SEM, FTIR	Penurunan berat $\pm 30\%$; permukaan plastik tererosi dan berpori; indikasi aktivitas enzimatis (laccase)	(Sáenz, et al., 2019)
2	PP (Polypropylene)	<i>A. terreus</i> ATC C 20542 (laboratorium industri)	Media mineral; suhu ruang	90 hari	UV / Panas / Fenton	Weight loss, FTIR, SEM, model kinetika	Weight loss tertinggi 25,29% (MFPP UV-treated); muncul retakan dan penurunan gugus karbonil	(Samat et al., 2023)
3	HDPE (High-Density Polyethylene)	Isolat tanah TPA (India)	Sabouraud broth, 28 °C, 150 rpm	30 hari	Tidak ada	Weight loss, observasi koloni	Penurunan berat 7,59%; biofilm tebal di permukaan HDPE	(Singh et al., 2012)
4	LDPE (Low-Density Polyethylene)	Isolat <i>A. terreus</i> dari TPA	Media limbah padat steril (simulasi landfill)	100 hari	UV (25 hari)	FTIR, SEM, TOC	Muncul gugus karbonil baru; peningkatan TOC; erosi permukaan plastik	(Zahra et al., 2010)
5	PE (Polyethylene)	<i>A. terreus</i> laut (marine fungus)	Sistem air laut buatan (simulasi laut)	Tidak disebut ($\pm 60-90$ hari)	UV weathering	Evolusi CO ₂ , FTIR	Bukti mineralisasi PE menjadi CO ₂ setelah fotooksidasi	(Lesuis et al., 2025)
6	PE (kantong & botol)	Isolat tanah pertanian (Tanzania)	Bushnell-Haas agar + bubuk PE 0,1%	21 hari	Tidak ada	Diameter zona bening	Zona bening >60 mm; aktivitas depolimerisasi tinggi	(Nakei et al., 2022)
7	HDPE (pretreated)	<i>A. terreus</i> MF1 2 (India)	Kombinasi panas + UV + perlakuan kimia	60 hari	Ya (fisik & kimia)	Weight loss, SEM	Degradasi meningkat drastis setelah pretreatment	(Balasubramanian et al., 2014)
8	LDPE, HDPE, PUR	Ringkasan multi-lingkungan	—	—	—	—	<i>A. terreus</i> termasuk jamur kunci pendegradasi polimer sintesis global	(Ekanayaka et al., 2022)

mengenai potensi jamur dalam mendegradasi plastik terus berkembang dalam dua dekade terakhir, seiring meningkatnya kesadaran akan kebutuhan solusi biodegradasi yang ramah lingkungan. Salah satu spesies jamur yang banyak dilaporkan memiliki kemampuan biodegradasi terhadap berbagai jenis polimer sintesis adalah *Aspergillus terreus*. Jamur ini termasuk dalam

kelas *Eurotiomycetes*, famili *Trichocomaceae*, dan dikenal sebagai saprofit tanah yang tersebar luas di ekosistem darat maupun pesisir. Selain menghasilkan berbagai metabolit sekunder bernilai ekonomi, *A. terreus* juga menunjukkan aktivitas enzimatik yang berperan penting dalam proses degradasi bahan organik maupun polimer sintesis.

Bukti eksperimental yang mendukung kemampuan *A. terreus* dalam mendegradasi plastik telah dilaporkan dalam berbagai penelitian dengan jenis polimer, kondisi lingkungan, dan metrik pengukuran yang berbeda. [Sáenz et al. \(2019\)](#) meneliti kemampuan *A. terreus* dan *A. niger* dalam mendegradasi Low-Density Polyethylene (LDPE) pada media mineral dengan sumber karbon terbatas. Setelah inkubasi selama 90 hari, hasil pengamatan menunjukkan penurunan berat hingga sekitar 30%, dengan permukaan LDPE yang tererosi dan berpori ketika dianalisis menggunakan mikroskop elektron (SEM). Analisis FTIR juga mengindikasikan perubahan gugus fungsi karbonil, menandakan adanya oksidasi dan pemutusan rantai polimer akibat aktivitas enzim oksidatif seperti laccase.

Hasil serupa dilaporkan oleh [Zahra et al. \(2010\)](#) yang mengisolasi *A. terreus* dari tempat pembuangan akhir (TPA) dan menguji kemampuannya dalam mendegradasi LDPE yang telah diberi pra-perlakuan sinar UV selama 25 hari. Inkubasi selama 100 hari dalam media limbah padat steril menunjukkan perubahan struktur permukaan plastik, peningkatan kadar karbon organik total (TOC), serta munculnya gugus karbonil baru berdasarkan hasil FTIR, menandakan terjadinya proses oksidasi dan depolimerisasi.

Pada polimer lain, *A. terreus* juga menunjukkan kemampuan biodegradasi yang signifikan terhadap polypropylene (PP). Studi oleh [Samat et al. \(2023\)](#) menguji *A. terreus* strain ATCC 20542 terhadap PP dalam bentuk film, granul, dan film metalik yang telah mengalami pra-perlakuan UV, panas, atau reagen Fenton. Setelah 90 hari inkubasi, *A. terreus* menunjukkan penurunan berat hingga 25,29% pada film PP yang terpapar UV. Analisis FTIR memperlihatkan penurunan indeks karbonil dan hidroksil, sedangkan SEM menunjukkan pembentukan retakan dan pori besar akibat degradasi permukaan. Peneliti juga menghitung konstanta kinetika dan waktu paruh ($t_{1/2}$) untuk tiap kondisi, menunjukkan aktivitas enzimatik yang signifikan terhadap polimer yang telah dioksidasi.

Sementara itu, [Singh et al. \(2012\)](#) melaporkan bahwa *A. terreus* yang diisolasi dari tanah TPA dapat menurunkan berat High-Density Polyethylene (HDPE) sebesar 7,59% dalam waktu 30 hari tanpa pra-perlakuan. Meskipun nilai ini relatif kecil, permukaan HDPE menunjukkan adanya kolonisasi biofilm tebal dan perubahan topografi yang jelas di bawah mikroskop elektron.

Penelitian di lingkungan laut juga memberikan bukti penting. [Lesuis et al. \(2025\)](#) menemukan bahwa jamur laut *A. terreus* mampu memineralisasi polyethylene (PE) yang telah mengalami fotooksidasi alami. Pengamatan evolusi CO₂ selama inkubasi membuktikan bahwa *A. terreus* tidak hanya menyebabkan kerusakan fisik, tetapi juga memetabolisme fragmen polimer menjadi senyawa anorganik sederhana, menandakan terjadinya proses mineralisasi penuh.

Dalam studi lain, [Nakei et al. \(2022\)](#) melaporkan bahwa *A. terreus* yang diisolasi dari tanah pertanian menunjukkan kemampuan mendegradasi kantong dan botol polyethylene dengan menghasilkan zona bening lebih dari 60 mm pada medium Bushnell Haas agar yang hanya mengandung PE sebagai sumber karbon. Hal ini mengindikasikan kemampuan *A. terreus* mengekspresikan enzim depolimerase yang mampu melarutkan rantai polimer di sekitar koloni jamur.

Secara keseluruhan, temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa *Aspergillus terreus* memiliki kemampuan biodegradasi terhadap berbagai jenis plastik sintesis, terutama LDPE, HDPE, dan PP. Efisiensi degradasi meningkat secara signifikan ketika plastik mengalami pra-

perlakuan (misalnya UV, panas, atau oksidasi kimia), yang berfungsi memperkenalkan gugus polar dan melemahkan ikatan karbon karbon pada rantai polimer.

Metode analisis yang digunakan pada berbagai penelitian juga cukup konsisten, meliputi penurunan berat (weight loss), analisis gugus fungsi (FTIR), pengamatan permukaan (SEM), pengukuran karbon organik total (TOC), serta pengamatan evolusi CO₂ untuk menilai mineralisasi. Rata-rata efisiensi penurunan berat berkisar antara 7% hingga 30% dalam periode 30-100 hari tergantung pada jenis polimer dan kondisi perlakuan.

Berdasarkan bukti tersebut, dapat disimpulkan bahwa *A. terreus* merupakan salah satu jamur yang paling potensial untuk dikembangkan dalam bioteknologi penguraian plastik. Aktivitas enzim oksidatif seperti laccase, peroksidase, dan cutinase diduga berperan penting dalam proses depolimerisasi awal, diikuti dengan metabolisme fragmen polimer menjadi molekul organik sederhana. Namun demikian, meskipun hasil laboratorium menunjukkan potensi yang menjanjikan, penerapan skala besar masih membutuhkan penelitian lanjutan terkait optimasi kondisi pertumbuhan, efisiensi enzim, dan kestabilan proses dalam sistem lingkungan yang kompleks.

3. Perkembangan CRISPR/Cas9 dan Strategi Rekayasa Genetik pada Jamur Filamen dan Genus *Aspergillus*

Kemajuan dalam bidang bioteknologi jamur berfilamen (filamentous fungi) telah menghasilkan lompatan besar dalam dekade terakhir, terutama melalui penerapan sistem CRISPR/Cas9 sebagai alat pengeditan genom yang presisi, efisien, dan serbaguna. Jamur dari genus *Aspergillus* menjadi model utama karena karakteristiknya yang mudah dikultur, kapasitas sekresi protein tinggi, dan potensi industri yang luas mulai dari produksi enzim, asam organik, hingga metabolit sekunder bernilai ekonomi.

a. Evolusi Sistem CRISPR/Cas9 pada Jamur Filamen

Sistem CRISPR/Cas9 pertama kali diadaptasi untuk jamur berfilamen pada pertengahan 2010-an, tetapi efisiensinya pada awalnya rendah karena dominannya jalur non-homologous end joining (NHEJ) dan keterbatasan sistem ekspresi sgRNA [Jin et al. \(2022\)](#) menegaskan bahwa sejak pengenalan Cas9 dari *Streptococcus pyogenes* dan sistem ekspresi plasmid yang dapat disesuaikan dengan promotor jamur, efisiensi knock-out gen pada *Aspergillus nidulans*, *A. oryzae*, dan *A. terreus* meningkat tajam hingga 80–90%. Sistem ini mampu melakukan penghapusan gen tunggal, penggantian promotor, dan penyisipan gen heterolog dengan tingkat keberhasilan tinggi.

Perkembangan berikutnya, sebagaimana dirinci oleh [Ma et al. \(2025\)](#) menekankan penyederhanaan konstruksi plasmid Cas9/sgRNA dan penerapan ribonucleoprotein (RNP)-based delivery, yang menghindari integrasi DNA asing dan mengurangi risiko mutasi off-target. Strategi ini menjadikan *Aspergillus* sebagai platform unggulan untuk penelitian metabolik, biosintesis, dan bioremediasi.

b. Optimalisasi Promotor dan Sistem Seleksi

Keberhasilan CRISPR pada jamur filamen tidak hanya bergantung pada Cas9 dan sgRNA, tetapi juga pada sistem ekspresi dan seleksi yang efisien. [Shen et al. \(2024\)](#) menjelaskan bahwa promotor konstitutif kuat seperti P_{gpdA} (glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase promoter), P_{tef1} (translation elongation factor), dan P_{trpC} (tryptophan synthetase promoter) merupakan elemen kunci untuk memastikan ekspresi Cas9 dan sgRNA yang stabil pada *Aspergillus spp.* Selain itu, penggunaan strain yang kehilangan aktivitas NHEJ telah meningkatkan rekombinasi homolog hingga 10 kali lipat. Kombinasi dengan sistem seleksi auxotrof pyrG (urasil/uridin) dan marker resistensi antibiotik seperti hygromycin dan bleomycin, memungkinkan pengeditan berulang tanpa akumulasi marker genetik.

- c. Sistem CRISPR-Cas9 yang Ditingkatkan untuk *Aspergilli*
[Modaffari et al. \(2024\)](#) memperkenalkan versi CRISPR yang disempurnakan khusus untuk *Aspergillus* yaitu Cas9-nickase (nCas9) dan Cas12a/Cpf1, yang menawarkan pemotongan DNA lebih presisi dan fleksibilitas PAM site yang lebih luas ([Modaffari et al., 2024](#)). Sistem ini memungkinkan editing multiplex, di mana beberapa gen dapat dimodifikasi secara bersamaan tanpa mengorbankan viabilitas sel.
 Selanjutnya, [Li et al. \(2025\)](#) menyoroti kemunculan pendekatan CRISPRa (*activation*) dan CRISPRi (*interference*) pada jamur filamen, yang tidak hanya memotong DNA tetapi juga mampu mengaktifkan atau menekan ekspresi gen target secara reversible ([Li et al., 2025](#)). Teknologi ini membuka peluang besar untuk mengatur ekspresi gen-gen enzimatik yang terlibat dalam dekomposisi lignoselulosa, polimer sintetis, atau bahkan metabolit sekunder yang “silent”.
 - d. Ekspresi Heterolog dan Produksi Enzim pada *Aspergillus*
 Selain pengeditan gen, *Aspergillus* juga dikenal sebagai sistem ekspresi heterolog yang efisien untuk produksi protein rekombinan, termasuk enzim industri dan enzim pengurai polimer. [Sheng et al. \(2025\)](#) dan [Liu et al. \(2023\)](#) menekankan bahwa spesies seperti *A. oryzae*, *A. niger*, dan *A. terreus* memiliki kapasitas sekresi protein tinggi dan mampu mengekspresikan protein kompleks dengan modifikasi pasca-translasi yang mirip dengan organisme eukariotik tingkat tinggi.
 Dengan dukungan CRISPR, penggabungan gen enzim dari mikroba pengurai plastik seperti *Ideonella sakaiensis* (PETase, MHETase) ke dalam *Aspergillus* menjadi semakin memungkinkan. *Aspergillus* dapat dikonfigurasi untuk mengekspresikan enzim-enzim tersebut di bawah kontrol promotor kuat seperti Pgpda, serta menggunakan signal peptide sekresi endogen untuk pelepasan ke medium, menjadikannya kandidat ideal untuk biodegradasi plastik berbasis enzim.
 - e. Implikasi bagi Rekayasa Jalur Enzim Pengurai Plastik
 Dengan kematangan sistem CRISPR pada jamur filamen, kini dimungkinkan untuk:
 - 1) Meng-overekspresikan enzim oksidatif dan depolimerase (misalnya *laccase*, *cutinase*, *esterase*) melalui promotor konstitutif atau induktif.
 - 2) Mengaktifkan klaster gen “silent” yang berpotensi mengode enzim pengurai polimer melalui sistem CRISPRa atau rekayasa epigenetik (misalnya knock-down *hdaA* atau overekspresi *laeA*).
 - 3) Mengintegrasikan gen heterolog dari mikroorganisme pengurai plastik dengan sistem sekresi tinggi khas *Aspergillus*.
 - 4) Menyusun strain multi-fungsi yang mampu tidak hanya mendegradasi plastik tetapi juga mengonversi monomer hasil degradasi menjadi metabolit bernilai industri.
 Dengan pendekatan ini, *Aspergillus* berpotensi menjadi platform bioindustri generasi baru dalam pengelolaan limbah plastik, memadukan keunggulan genetik, kapasitas sekresi tinggi, dan fleksibilitas metabolik.
- 4. Perangkat Rekayasa Genetik pada *A. terreus***
- a. **Perkembangan Perangkat Rekayasa Genetik pada *Aspergillus terreus* dan Implikasinya bagi Jalur Enzim Pengurai Plastik**
 Perkembangan teknologi rekayasa genetik pada jamur berfilamen telah membuka peluang besar bagi pengoptimalan fungsi biologis dan produksi metabolit sekunder yang bernilai tinggi. Salah satu spesies yang banyak diteliti adalah *Aspergillus terreus*, jamur saprofit dari kelas *Eurotiomycetes* yang dikenal sebagai produsen utama asam itakonat dan lovastatin. Dalam beberapa tahun terakhir, kemajuan signifikan telah dicapai dalam pengembangan alat dan sistem genetik yang memungkinkan modifikasi genom *A. terreus* secara presisi, termasuk penerapan teknologi CRISPR/Cas9, promotor kuat spesifik host, dan sistem seleksi yang efisien.

1) Sistem Transformasi dan Alat Dasar Genetik

Awalnya, *A. terreus* dikenal sulit direkayasa karena dinding selnya yang tebal dan kecenderungan tinggi terhadap mekanisme non-homologous end joining (NHEJ). Namun, penelitian oleh [Wingfield et al. \(2022\)](#) berhasil mengembangkan berbagai pendekatan transformasi, termasuk metode PEG-mediated protoplast transformation dan elektroporasi konidia, yang menghasilkan efisiensi transformasi tinggi pada strain laut *A. terreus* RA2905. Dalam studi ini, dikembangkan pula strain Δ pyrG Δ ku70 yang berfungsi sebagai latar belakang host rekayasa genetik.

- a) Penghapusan *pyrG* memungkinkan seleksi positif dan negatif (melalui 5-fluoroorotik acid),
- b) Sedangkan penghapusan *ku70* meningkatkan frekuensi rekombinasi homologus hingga beberapa kali lipat.

Kombinasi kedua mutasi ini menjadikan *A. terreus* RA2905 sebagai model genetik yang ideal untuk eksperimen knock-in dan knock-out gen yang kompleks.

2) Sistem CRISPR/Cas9 dan Aplikasinya pada *A. terreus*

Penerapan sistem CRISPR/Cas9 di *A. terreus* pertama kali dilaporkan oleh [Brennan \(2022\)](#) melalui pengembangan vektor turunan pFC332 (Sistem ini menggunakan promotor *gpdA* endogen dari *A. terreus* untuk mengendalikan ekspresi *sgRNA*, meningkatkan kompatibilitas ekspresi dibandingkan promotor dari spesies lain. CRISPR ini telah berhasil digunakan untuk:

- a) Knock-out gen *lovB* dan *lovR* pada jalur biosintesis lovastatin,
- b) Targeted insertion gen *lovF* secara presisi,
- c) Double-gRNA deletion untuk penghapusan gen *ku70* dan *pyrG*.

Hasilnya menunjukkan tingkat efisiensi penghapusan gen mencapai lebih dari 60% tanpa integrasi marker permanen. Selain itu, Wingfield et al. (2022) memperkenalkan versi marker-free CRISPR system yang mengombinasikan plasmid Cas9 non-integratif dan donor DNA pendek, menghasilkan efisiensi penghapusan gen *stuA* hingga 71%.

Penerapan sistem ini menandai tonggak penting dalam bioteknologi *A. terreus*, karena memungkinkan pengeditan berulang (*iterative editing*) untuk rekayasa multi-gen dan penghapusan marker seleksi setelah proses selesai.

3) Promotor dan Sistem Seleksi yang Efektif

Keberhasilan rekayasa genetik sangat bergantung pada promotor kuat dan sistem seleksi yang stabil.

- a) Promotor *gpdA* (*glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase*) dari *A. terreus* telah terbukti efektif untuk ekspresi gen endogen maupun heterolog, seperti pada sistem CRISPR (Shi & Wang, 2021)
- b) Promotor konstitutif lain seperti *tef1*, *citA*, dan *acoA* juga dilaporkan mendukung ekspresi tinggi dalam rekayasa jalur asam itakonat ([Huang et al., 2014](#)).

Sementara itu, sistem seleksi menggunakan auxotrof *pyrG* memungkinkan siklus seleksi dan counter-selection efisien, di mana transforman dapat dipilih pada media tanpa urasil, dan plasmid dapat dihilangkan menggunakan 5-FOA. Kombinasi dengan strain Δ ku70 meningkatkan integrasi homologus, menjadikan *A. terreus* lebih mudah dimodifikasi dibandingkan sebelumnya.

4) Rekayasa Jalur Metabolik dan Regulasi Global

Penelitian Huang et al. (2014) menunjukkan bahwa overekspresi gen-gen jalur biosintesis seperti *cadA* (cis-aconitate decarboxylase) dan *mfsA* (transporter MFS) mampu meningkatkan produksi asam itakonat hingga hampir 10%. Pendekatan serupa dapat diterapkan pada jalur lain yang melibatkan enzim oksidatif atau depolimerase yang potensial untuk degradasi plastik.

5) Potensi Rekayasa Jalur Enzim Pengurai Plastik

Berdasarkan perangkat genetik yang telah tersedia, *A. terreus* memiliki potensi kuat untuk direkayasa sebagai platform bioteknologi pengurai plastik. Beberapa strategi yang dapat diterapkan antara lain:

- Overekspresi enzim depolimerase endogen (*laccase*, *peroxidase*, *cutinase*, *esterase*) dengan promotor konstitutif *gpdA* untuk meningkatkan aktivitas degradasi polimer.
- Integrasi gen heterolog dari mikroorganisme pengurai plastik, seperti *PETase* atau *MHETase* dari *Ideonella sakaiensis*, menggunakan sistem CRISPR untuk ekspresi sekresi di *A. terreus*.
- Rekayasa regulator epigenetik (*LaeA/HdaA*) untuk mengaktifkan kluster enzim yang berpotensi memiliki aktivitas depolimerisasi namun tidak terekspresi di kondisi normal.

Modifikasi metabolik untuk memperkuat jalur kofaktor (NADPH, FAD) yang mendukung reaksi oksidatif enzim pengurai plastik. Dengan sistem marker-free CRISPR/Cas9 dan host $\Delta ku70\Delta pyrG$, memungkinkan modifikasi multipel yang efisien dan stabil, sehingga *A. terreus* dapat berperan ganda sebagai penghasil enzim biodegradasi sekaligus pabrik biokonversi untuk produk hasil degradasi plastik.

5. Enzim Target dan Strategi Optimasi

Jamur filamentous seperti *Aspergillus terreus* menunjukkan potensi nyata sebagai agen degradasi plastik berbasis biologis, terutama untuk plastik jenis poliolefin seperti polipropilena (PP). Studi berita melaporkan bahwa spesies ini mampu menguraikan PP setelah perlakuan awal dengan radiasi UV atau panas, dengan penurunan massa plastik sebesar 21 % dalam 30 hari dan hingga 25-27 % dalam 90 hari (Fungi Makes Meal of Hard-to-Recycle Plastic - The University of Sydney, 2023).

Hal ini mengindikasikan bahwa enzim-enzim oksidatif yang dilepaskan oleh *A. terreus* seperti *laccase* dan *peroksidase* berkemungkinan menjadi “inisiator” oksidasi permukaan plastik, sehingga memecah ikatan C–C atau C–H yang sangat stabil di poliolefin sebelum langkah degradasi selanjutnya dapat berlangsung (Temporiti et al., 2022). Sebagai contoh, ulasan menyebut bahwa plastik seperti PE, PS, PP memiliki ikatan-C yang sangat inert sehingga membutuhkan oksidasi oleh enzim oksidoreduktase (*laccase*, *peroksidase*) sebelum degradasi lebih lanjut (Temporiti et al., 2022). Karena *A. terreus* telah terbukti mens ekresikan berbagai enzim ekstraseluler dalam sekretomnya, hal ini memperkuat posisi *A. terreus* sebagai kandidat host rekayasa genetik untuk produksi enzim pengurai plastik (Plouhinec et al., 2024).

Meski demikian, apabila targetnya adalah plastik jenis poli(ethylene terephthalate) (PET) yang memiliki ikatan ester aromatik, maka enzim kunci yang paling prospektif bukanlah semata enzim oksidatif, melainkan enzim hidrolitik seperti *cutinase* atau *PET-hydrolase* yang secara spesifik mampu memecah ikatan ester dalam struktur PET. Ulasan lintas-jamur menyimpulkan bahwa untuk poliester sintesis tersebut, enzim hidrolase (*cutinase/lipase/esterase*) tampil sebagai aktor utama degradasi (Srikanth et al., 2022).

Namun hingga saat ini belum ada publikasi yang secara definitif mengkarakterisasi *cutinase* atau *PET-hydrolase* asal *A. terreus* dengan data kinetika lengkap, sehingga strategi yang masuk akal adalah menggunakan *A. terreus* sebagai host rekayasa genetik untuk mengekspresikan enzim-hidrolase dari spesies jamur lain yang telah terbukti efektif terhadap PET. Lebih lanjut, penggunaan *A. terreus* sebagai host mempertimbangkan bahwa jamur ini telah terbukti mampu menyekresikan enzim secara efisien dalam konteks sekresi industri(Plouhinec et al., 2024a).

Terakhir, meskipun potensi *A. terreus* cukup besar, perlu diingat bahwa terdapat tantangan ekspresi/sekresi termasuk bottleneck dalam jalur sekresi, over-glikosilasi protein sekresi, degradasi proteolitik ekstraseluler, dan regulasi ekspresi yang kuat terhadap substrat dan kondisi kultur yang harus diantisipasi dalam pemrograman genetik enzim pengurai plastik ini (Liu et al., 2023).

Produksi dan pembuangan plastik global terus meningkat, dengan estimasi sekitar 460 juta ton plastik diproduksi tiap tahun dan jumlah ini diproyeksikan akan tiga kali lipat pada 2060 jika tidak ada intervensi, sehingga menimbulkan kebutuhan mendesak akan strategi degradasi yang lebih berkelanjutan termasuk pendekatan biologi berbasis mikroorganisme ([UNEP, 2025](#)).

Berbagai tinjauan menunjukkan bahwa jamur filamentous merupakan kelompok penting dalam biodegradasi plastik karena mampu menghasilkan enzim oksidatif dan hidrolitik yang menyerang struktur polimer kompleks. ([Srikanth et al., 2022](#)). Secara khusus, kajian oleh [Srikanth et al. \(2022\)](#) dan [Ekanayaka et al. \(2022\)](#) menyoroti genus *Aspergillus* sebagai salah satu taksa yang paling sering dilaporkan terlibat dalam degradasi plastik jenis poliolefin maupun poliester, sehingga relevan untuk dikembangkan lebih lanjut dalam konteks rekayasa genetik.

Untuk plastik jenis low-density polyethylene (LDPE), [Sáenz \(2019\)](#) menunjukkan bahwa *Aspergillus terreus* mampu menurunkan massa LDPE dan menyebabkan retakan permukaan yang jelas setelah inkubasi, yang mengindikasikan terjadinya proses biodeteriorasi.

Analisis FTIR pada studi tersebut memperlihatkan munculnya gugus karbonil baru pada film LDPE, yang umumnya dikaitkan dengan serangan enzim oksidatif seperti laccase dan peroksidase terhadap ikatan C–C dan C–H rantai polimer ([Sáenz, 2019](#)).

Tinjauan global tentang fungi pemakan plastik juga menempatkan *A. terreus* sebagai salah satu spesies yang berkontribusi pada degradasi LDPE, dan mengaitkan aktivitas tersebut dengan produksi enzim oksidatif (laccase, peroksidase) yang berperan sebagai “inisiator” oksidasi permukaan plastik ([Ekanayaka et al., 2022](#)).

Dengan demikian, untuk target plastik PE/PP, laccase dan peroksidase yang disekresikan *A. terreus* dapat dianggap sebagai enzim kunci paling prospektif pada tahap awal oksidasi poliolefin sebelum fragmen teroksidasi diurai lebih lanjut oleh enzim hidrolitik lain ([Srikanth et al., 2022](#)).

Pada plastik polipropilena (PP), penelitian [Samat dkk. \(2023\)](#) di jurnal *npj Materials Degradation* menunjukkan bahwa *A. terreus* bersama *Engyodontium album* mampu mendegradasi PP yang telah diberi perlakuan awal (UV, panas, atau Fenton), dengan penurunan massa dan perubahan sifat mekanik plastik yang signifikan setelah 90–140 hari inkubasi ([Samat et al., 2023](#)).

Peneliti menghubungkan keberhasilan degradasi PP ini dengan kombinasi enzim oksidatif (seperti laccase dan peroksidase) serta hidrolitik yang disekresikan jamur, sejalan dengan model mekanistik di mana oksidasi permukaan terlebih dahulu meningkatkan hidrofilisitas dan kerentanan polimer terhadap serangan enzim lanjutan (([Samat et al., 2023](#))).

Ulasan tentang fungi pengurai plastik kemudian mengonfirmasi bahwa untuk poliolefin seperti PE dan PP, kelompok enzim yang paling sering terlibat adalah laccase, Mn-peroksidase, dan lignin peroksidase, sehingga secara konseptual enzim-enzim ini menjadi target utama dalam rekayasa jalur degradasi poliolefin pada *A. terreus* ([Srikanth et al., 2022](#)).

Berbeda dengan poliolefin, poli(ethylene terephthalate) (PET) tersusun dari ikatan ester aromatik yang relatif lebih mudah dihidrolisis, sehingga enzim jamur yang paling prospektif adalah cutinase/PET-hydrolase dan lipase/esterase yang mampu memutus ikatan ester tereftalat ([Srikanth et al., 2022](#)).

Berbagai studi telah mengkarakterisasi cutinase jamur seperti dari *Fusarium* dan *Aspergillus* lain yang efektif menghidrolisis PET, tetapi hingga saat ini belum ada laporan yang secara rinci mengkarakterisasi PET-hydrolase spesifik berasal dari *A. terreus* dengan data struktur dan kinetika lengkap ([Ekanayaka et al., 2022](#)).

Karena itu, dalam konteks PET, peran *A. Terreus* lebih realistis diposisikan sebagai host rekayasa genetik untuk mengekspresikan cutinase atau PET-hydrolase dari jamur lain yang sudah

terbukti aktif terhadap PET, sementara *A. terreus* menyediakan platform sekresi enzim dan ketahanan proses yang baik ([Srikanth et al., 2022](#)).

Potensi *A. terreus* sebagai host rekayasa genetik didukung oleh studi secretome yang menunjukkan bahwa jamur ini secara alami mensekresikan beragam Carbohydrate-Active Enzymes (CAZymes) dan enzim hidrolitik lain dalam jumlah tinggi ketika ditumbuhkan pada substrat kompleks ([Plouhinec et al., 2024](#)).

Analisis secretome time-course oleh [Plouhinec et al. \(2024\)](#) mengungkap bahwa komposisi enzim sekresi *A. terreus* sangat dinamis dan dikendalikan oleh jenis substrat dan fase pertumbuhan, yang berarti bahwa ekspresi enzim pengurai plastik akan sangat dipengaruhi oleh desain promotor dan kondisi kultur yang digunakan.

Studi lain yang membandingkan secretome *A. terreus* dan *A. japonicus* untuk peningkatan degradabilitas bungkil kedelai juga menunjukkan adanya kombinasi hidrolase dan protease ekstraseluler dalam jumlah besar, mengindikasikan bahwa enzim rekombinan yang tidak stabil dapat dengan mudah terdegradasi bila tidak dilindungi atau jika protease tidak direkayasa ([Grandmontagne et al., 2021](#)).

Di sisi lain, literatur tentang produksi protein heterolog pada fungi filamentous menegaskan bahwa terdapat beberapa tantangan umum ekspresi/sekresi yang juga berlaku pada *A. terreus*, termasuk bottleneck pada jalur sekresi (ER–Golgi), stres lipatan protein yang memicu *unfolded protein response* (UPR), over-glikosilasi, dan degradasi proteolitik. ([Liu et al., 2023](#)).

[Liu et al. \(2023\)](#) merangkum berbagai strategi untuk meningkatkan produksi protein heterolog di fungi filamentous, seperti penggunaan promotor kuat dan dapat diinduksi, optimasi kodon, pemilihan signal peptide yang lebih efisien untuk sekresi, rekayasa situs glikosilasi, regulasi UPR, hingga konstruksi strain defisiensi protease, yang semuanya sangat relevan jika laccase atau PET-cutinase hendak diekspresikan di *A. terreus*.

Tinjauan terbaru oleh [Sheng et al. \(2025\)](#) secara khusus mengangkat *Aspergillus* (termasuk *A. terreus*) sebagai platform pabrik protein yang menarik karena kapasitas sekresi tinggi, toleransi terhadap kondisi fermentasi, dan ketersediaan alat genetika modern seperti CRISPR/Cas9, namun tetap menekankan perlunya rekayasa jalur sekresi dan pengendalian metabolit sekunder untuk mencapai yield enzim rekombinan yang optimal.

Berdasarkan seluruh temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa enzim kunci paling prospektif pada *A. terreus* untuk plastik PE/PP adalah laccase dan peroksidase sebagai inisiator oksidasi permukaan, sedangkan untuk PET, *A. terreus* lebih tepat dimanfaatkan sebagai host ekspresi bagi cutinase/PET-hidrolase dari jamur lain karena belum adanya PETase spesifik *A. terreus* yang terkarakterisasi ([Sáenz, 2019](#)).

Secara bersamaan, tantangan utama ekspresi dan sekresi di *A. terreus* yakni bottleneck jalur sekresi, over-glikosilasi, protease ekstraseluler, dan regulasi kuat oleh substrat/pH membuat rekayasa genetik terarah (misalnya optimasi promotor, signal peptide, knock-out protease, dan pengaturan UPR) menjadi langkah penting untuk mengoptimalkan produksi dan kestabilan enzim pengurai plastik di sistem ini ([Liu et al., 2023](#)).

D. Kesimpulan

Penelitian ini menegaskan bahwa *Aspergillus terreus* merupakan jamur filamentosa yang memiliki potensi besar dalam biodegradasi plastik berkat kemampuannya menghasilkan berbagai enzim oksidatif dan hidrolitik seperti *laccase*, *peroksidase*, *cutinase*, dan *esterase*. Bukti empiris menunjukkan bahwa spesies ini mampu mendegradasi berbagai jenis plastik sintesis seperti LDPE, HDPE, dan PP dengan efisiensi penurunan massa antara 7-30% tergantung kondisi dan pra-perlakuan.

Aktivitas degradasi meningkat signifikan ketika substrat plastik mengalami oksidasi awal (misalnya oleh UV atau reagen Fenton), yang memperkenalkan gugus polar dan mempermudah akses enzim terhadap rantai polimer.

Kemajuan bioteknologi, terutama sistem CRISPR/Cas9, telah membuka peluang untuk mengoptimalkan fungsi genetik *A. terreus* sebagai platform bioindustri. Berbagai studi menunjukkan bahwa teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi rekombinasi homolog, menghapus gen penghambat, serta memungkinkan ekspresi dan sekresi enzim target secara presisi. Penggunaan promotor konstitutif kuat seperti *PgpdA*, sistem seleksi *pyrG*, serta strain $\Delta ku70$ meningkatkan fleksibilitas rekayasa genom jamur ini. Dengan demikian, *A. terreus* dapat direkayasa untuk meng-overekspresikan enzim pengurai plastik endogen maupun mengekspresikan enzim heterolog seperti *PETase* dan *MHETase* dari mikroba lain.

Secara spesifik, enzim paling prospektif untuk degradasi poliolefin (PE/PP) adalah *laccase* dan *peroksidase* yang berperan sebagai inisiator oksidasi, sedangkan untuk poliester seperti PET, strategi yang lebih tepat adalah menggunakan *A. terreus* sebagai host ekspresi bagi *cutinase* atau *PET-hydrolase* dari jamur lain. Tantangan utama yang perlu diatasi mencakup bottleneck pada jalur sekresi, over-glikosilasi, degradasi proteolitik, serta regulasi kuat terhadap ekspresi enzim oleh kondisi kultur. Oleh karena itu, pendekatan rekayasa sistemik yang mencakup optimasi promotor, signal peptide, knock-out protease, dan pengendalian UPR sangat penting untuk memastikan yield dan kestabilan enzim rekombinan yang optimal.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa *A. terreus* berpotensi menjadi platform bioindustri generasi baru dalam pengelolaan limbah plastik melalui kombinasi kemampuan alami biodegradasi dan kekuatan rekayasa genetik modern. Pengembangan selanjutnya perlu difokuskan pada integrasi jalur enzim oksidatif–hidrolitik, aktivasi kluster gen “silent” melalui manipulasi epigenetik (*LaeA/HdaA*), serta validasi eksperimental degradasi plastik dalam sistem bioreaktor berskala besar untuk mendukung penerapan nyata di bidang bioremediasi dan ekonomi sirkular.

Daftar Pustaka

- Balasubramanian, V., Natarajan, K., Rajeshkannan, V., & Perumal, P. (2014). Enhancement of in vitro high-density polyethylene (HDPE) degradation by physical, chemical, and biological treatments. *Environmental Science and Pollution Research* 2014 21:21, 21(21), 12549–12562. <https://doi.org/10.1007/S11356-014-3191-2>
- Brennan, A. M. (2022). Development of synthetic biotics as treatment for human diseases. *Synthetic Biology*, 7(1), 1–7. <https://doi.org/10.1093/SYNBIO/YSAC001>
- Černoša, A., Cortizas, A. M., Traoré, M., Podlogar, M., Danevčič, T., Gunde-Cimerman, N., & Gostinčar, C. (2024). A screening method for plastic-degrading fungi. *Heliyon*, 10(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31130>
- Chigwada, A. D., Tekere, M., & Ogola, H. J. O. (2025). Ecological and genomic perspectives on fungal plastic biodegradation: Research progress, opportunities and challenges. *Ecological Genetics and Genomics*, 36, 100378. <https://doi.org/10.1016/J.EGG.2025.100378>
- Dueñas-Moreno, J., Mora, A., Kumar, M., Meng, X. Z., & Mahlknecht, J. (2023). Worldwide risk assessment of phthalates and bisphenol A in humans: The need for updating guidelines. *Environment International*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108294>

- Ekanayaka, A. H., Tibpromma, S., Dai, D., Xu, R., Suwannarach, N., Stephenson, S. L., Dao, C., & Karunarathna, S. C. (2022a). A Review of the Fungi That Degrade Plastic. *Journal of Fungi*, 8(8), 772. <https://doi.org/10.3390/JOF8080772/S1>
- Fungi makes meal of hard-to-recycle plastic - The University of Sydney*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2023/04/14/fungi-makes-meal-of-hard-to-recycle-plastic.html?utm_source=chatgpt.com
- Getino, L., Revilla-Gómez, J. A., Ariza-Carmona, L. M., Thijs, S., Didierjean, C., & Chamizo-Ampudia, A. (2025). Biodegradation of Petrochemical Plastics by Microorganisms: Toward Sustainable Solutions for Plastic Pollution. *Bacteria* 2025, Vol. 4, Page 44, 4(3), 44. <https://doi.org/10.3390/BACTERIA4030044>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017a). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.1700782;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Grandmontagne, D., Navarro, D., Neugnot-Roux, V., Ladevèze, S., & Berrin, J. G. (2021). The secretomes of *Aspergillus japonicus* and *Aspergillus terreus* supplement the rovbio® enzyme cocktail for the degradation of soybean meal for animal feed. *Journal of Fungi*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/JOF7040278>
- Huang, X., Lu, X., Li, Y., Li, X., & Li, J. J. (2014). Improving itaconic acid production through genetic engineering of an industrial *Aspergillus terreus* strain. *Microbial Cell Factories* 2014 13:1, 13(1), 119-. <https://doi.org/10.1186/S12934-014-0119-Y>
- Jin, F. J., Wang, B. T., Wang, Z. D., Jin, L., & Han, P. (2022). CRISPR/Cas9-Based Genome Editing and Its Application in *Aspergillus* Species. *Journal of Fungi*, 8(5), 467. <https://doi.org/10.3390/JOF8050467>
- Lesuis, C., Niemann, H., Kienhuis, MVM., van der Meer, MTJ., Vielfaure, H., Polerecky, L., & Vaksmaa, A. (2025). Mineralization of photodegraded polyethylene by the marine-derived fungus *Aspergillus terreus*. *Total Environment Microbiology*, 1(3), 100027. <https://doi.org/10.1016/J.TEMICR.2025.100027>
- Li, X. H., Lu, H. Z., Yao, J. B., Zhang, C., Shi, T. Q., & Huang, H. (2025). Recent advances in the application of CRISPR/Cas-based gene editing technology in Filamentous Fungi. *Biotechnology Advances*, 81, 108561. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2025.108561>
- Liu, D., Garrigues, S., & de Vries, R. P. (2023). Heterologous protein production in filamentous fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2023 107:16, 107(16), 5019–5033. <https://doi.org/10.1007/S00253-023-12660-8>
- Ma, B., Li, Y., Wang, T., Li, D., & Jia, S. (2025). Advances in CRISPR/Cas9-Based Gene Editing in Filamentous Fungi. *Journal of Fungi* 2025, Vol. 11, Page 350, 11(5), 350. <https://doi.org/10.3390/JOF11050350>
- Modaffari, D., Finlayson, A., Miao, Y., Wallace, E. W. J., & Sawin, K. E. (2024). Improved gene editing and fluorescent-protein tagging in *Aspergillus nidulans* using a Golden Gate-based CRISPR-Cas9 plasmid system. *Wellcome Open Research*, 9. <https://doi.org/10.12688/WELLCOMEOPENRES.23086.1>
- Mohanani, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., & Levin, D. B. (2020a). Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*, 11, 580709. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.580709/FULL>

- Mulder, K. C. L., Mulinari, F., Franco, O. L., Soares, M. S. F., Magalhães, B. S., & Parachin, N. S. (2015). Lovastatin production: From molecular basis to industrial process optimization. *Biotechnology Advances*, 33(6), 648–665. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2015.04.001>
- Nakei, M. D., Misinzo, G., Tindwa, H., & Semu, E. (2022). Degradation of polyethylene plastic bags and bottles using microorganisms isolated from soils of Morogoro, Tanzania. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1077588. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.1077588/BIBTEX>
- Ogunbayo, A. O., Olanipekun, O. O., & Adamu, I. A. (2019). Preliminary Studies on the Microbial Degradation of Plastic Waste Using *Aspergillus niger* and *Pseudomonas* sp. *Journal of Environmental Protection*, 10, 625–631. <https://doi.org/10.4236/jep.2019.105037>
- Plastic Treaty progress puts spotlight on circular economy*. (n.d.-a). Retrieved November 11, 2025, from https://www.unep.org/news-and-stories/story/plastic-treaty-progress-puts-spotlight-circular-economy?utm_source=chatgpt.com
- Plouhinec, L., Bonnin, E., Kielbasa, M., Armengaud, J., Neugnot, V., Berrin, J. G., & Lafond, M. (2024b). A time-course analysis of *Aspergillus terreus* secretomes reveals the importance of pectin-degrading enzymes to increase the digestibility of soybean meal. *Applied and Environmental Microbiology*, 90(9). <https://doi.org/10.1128/AEM.02153-23;SUBPAGE:STRING:FULL>
- Ritchie, H., Samborska, V., & Roser, M. (2023). Plastic Pollution. *Our World in Data*. <https://doi.org/10.1787/DE747AEF-EN>
- Sáenz, M., Cardenas, G., & Cruz, L. (2019). Minimal conditions to degrade LDPE by *Aspergillus terreus* and *A. niger*. *Journal of Ecological Engineering*, 20(8), 194–201. - Google Search. (n.d.). Retrieved October 16, 2025, from <https://www.google.com/search?q=S%C3%A1enz%2C+M.%2C+Cardenas%2C+G.%2C+%26+Cruz%2C+>
- Samat, A. F., Carter, D., & Abbas, A. (2023). Biodeterioration of pre-treated polypropylene by *Aspergillus terreus* and *Engyodontium album*. *Npj Materials Degradation* 2023 7:1, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00342-9>
- Shen, Q., Ruan, H., Zhang, H., Wu, T., Zhu, K., Han, W., Dong, R., Ming, T., Qi, H., & Zhang, Y. (2024). Utilization of CRISPR-Cas genome editing technology in filamentous fungi: function and advancement potentiality. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1375120. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2024.1375120/FULL>
- Sheng, Y., Qiu, S., Deng, Y., & Zeng, B. (2025). Recent Advances in Heterologous Protein Expression and Natural Product Synthesis by *Aspergillus*. *Journal of Fungi* 2025, Vol. 11, Page 534, 11(7), 534. <https://doi.org/10.3390/JOF11070534>
- Shi, B., & Wang, T. (2021). Analysis of Entrepreneurial Motivation on Entrepreneurial Psychology in the Context of Transition Economy. *Frontiers in Psychology*, 12, 680296. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2021.680296/BIBTEX>
- Shih, S. Y., Mortensen, U. H., Chang, F. R., & Tsai, H. Y. (2022). Editing *Aspergillus terreus* using the CRISPR-Cas9 system. *Synthetic Biology*, 7(1). <https://doi.org/10.1093/SYNBIO/YSAC031>
- Singh, V., Dubey, M., & Bhadauria, S. (n.d.). Biodeterioration of Polyethylene High Density by *Aspergillus versicolor* and *Aspergillus terreus*.

- Srikanth, M., Sandeep, T. S. R. S., Sucharitha, K., & Godi, S. (2022a). Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing* 2022 9:1, 9(1), 42-. <https://doi.org/10.1186/S40643-022-00532-4>
- Srikanth, M., Sandeep, T. S. R. S., Sucharitha, K., & Godi, S. (2022b). Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 42. <https://doi.org/10.1186/S40643-022-00532-4>
- Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., & Tosi, S. (2022). Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *Microorganisms*, 10(6), 1180. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10061180>
- Vassileva, M., Malusá, E., Eichler-Löbermann, B., & Vassilev, N. (2020). *Aspegillus terreus*: From Soil to Industry and BackQ2Microorganisms; H-Index: 49 SJR: Q2 CORE: NA ABDC: NA FT50: NA 1Microorganisms; H-Index: 49 VHB: NA FNEGE: NA CoNRS: NA HCERE: NA CCF: NA BFI: 1 AJG: NA +. *Microorganisms*, 8(11), 1–10. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS8111655>
- Wingfield, B. D., Wingfield, M. J., & Duong, T. A. (2022). Molecular basis of cycloheximide resistance in the Ophiostomatales revealed. *Current Genetics* 2022 68:3, 68(3), 505–514. <https://doi.org/10.1007/S00294-022-01235-1>
- Zahra, S., Abbas, S. S., Mahsa, M. T., & Mohsen, N. (2010). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by isolated fungi in solid waste medium. *Waste Management*, 30(3), 396–401. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2009.09.027>