

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Tanaman kakao merupakan salah satu tanaman perkebunan yang memiliki potensi dan peluang besar untuk dikembangkan karena termasuk komoditas unggulan di Indonesia. Tanaman ini berperan penting bagi perekonomian nasional, terutama sebagai penyedia lapangan kerja, sumber pendapatan masyarakat, serta penghasil devisa negara. Menurut International Cocoa Organization (ICCO) tahun 2022, produksi kakao dunia mencapai 4,82 juta ton, dan Indonesia menempati peringkat ketiga sebagai negara penghasil kakao terbesar di dunia setelah Pantai Gading dan Ghana.

Berdasarkan data statistik perkebunan nasional, luas areal pertanaman kakao di Indonesia pada periode 2024-2025 berada di kisaran 1,36 juta hektar. Fenomena ini bukan sekadar masalah ketersediaan lahan, melainkan merupakan manifestasi dari tekanan konversi lahan ke komoditas ekstraktif lain seperti kelapa sawit dan jagung, serta degradasi tegakan akibat dominasi tanaman tua yang melampaui siklus ekonomi produktifnya. Penurunan luas lahan ini berimplikasi langsung terhadap kapasitas produksi. Meskipun angka produksi diproyeksikan tumbuh moderat dari 621.000 ton (2024) menuju target 640.000 ton (2026) melalui skema rekayasa kebijakan seperti intensifikasi dan peremajaan (*replanting*), produktivitas riil per hektar masih jauh di bawah potensi genetiknya (Kementerian Pertanian, 2024). Rendahnya efisiensi produksi ini secara fundamental dipicu oleh dua faktor utama yang saling berinteraksi secara sinergis yaitu Persistensi serangan Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT), dan busuk buah (*Lasiodiplodia theobromae*), yang seringkali diperparah oleh manajemen limbah kulit buah kakao yang suboptimal di area pertanaman. Serta Penurunan kualitas fisik dan biologis tanah akibat penggunaan input kimiawi jangka panjang yang memicu penurunan aktivitas mikroba fungsional tanah.

Rendahnya kesuburan tanah menjadi salah satu penyebab utama menurunnya produksi tanaman kakao. Tanaman ini membutuhkan unsur hara yang lengkap untuk mendukung pertumbuhannya, namun saat ini banyak lahan mengalami degradasi kesuburan akibat kurangnya penambahan bahan organik. Bahan organik merupakan hasil dekomposisi sisa organisme hidup yang dikembalikan ke tanah untuk memperbaiki struktur tanah dan menjaga ketersediaan unsur hara (Kabelka et al., 2025). Menurut Reijntjes et al. (1992), bahan organik dapat dikelola dengan berbagai cara, salah satunya dengan mengembalikannya langsung ke tanah, baik sebagai mulsa di permukaan maupun dengan cara dipendam. Nivethadevi et al. (2021) menegaskan bahwa bahan organik berperan penting dalam meningkatkan kualitas dan kuantitas produksi pertanian, memperbaiki kualitas lahan, serta mengurangi pencemaran lingkungan secara berkelanjutan.

Tanaman kakao menghasilkan biomassa yang cukup tinggi, baik dari daun

maupun ranting, yaitu sekitar 6,85 ton/ha/tahun untuk tanaman tanpa naungan dan mencapai 11,88 ton/ha/tahun pada tanaman dengan naungan. Dari hasil panen per hektar, diperoleh sekitar 6.200 kg kulit buah dan 2.178 kg biji basah (Nasaruddin, 2010). Limbah kulit kakao yang tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan masalah lingkungan, seperti bau tidak sedap dan menjadi tempat berkembangnya hama serta penyakit tanaman. Padahal, limbah tersebut berpotensi dikembalikan ke lahan untuk memperbaiki kesuburan tanah dan sekaligus mengurangi sumber inokulum patogen. Kandungan unsur hara kulit buah kakao cukup tinggi, terutama Kalium dan Nitrogen. Sekitar 61% dari total nutrisi buah kakao tersimpan dalam kulitnya. Goenadi (2003) melaporkan bahwa kompos dari kulit buah kakao mengandung 1,81% N, 26,61% C-organik, 0,31% P₂O₅, 6,08% K₂O, 1,22% CaO, 1,37% MgO, dan KTK 44,85 cmol/kg. Aplikasi kompos kulit kakao bahkan dapat meningkatkan produksi hingga 19,48%. Oleh karena itu, diperlukan inovasi pengelolaan limbah kulit kakao melalui pemanfaatan mikroba pengurai.

Selain faktor kesuburan tanah, serangan hama dan penyakit juga menjadi penyebab utama penurunan produksi kakao. Penyakit yang umum menyerang antara lain busuk buah, serta penyakit yang disebabkan oleh *L. theobromae* (*Diplodia* sp.), yang dapat menginfeksi hampir seluruh bagian tanaman dan menyebabkan busuk buah, mati ranting, mati pucuk, hingga kanker batang (Huda-Shakirah et al., 2022). Tanaman yang terinfeksi menunjukkan gejala khas berupa daun menguning dari ujung hingga pangkal ranting, serta daun yang tetap menempel pada batang (Alves, 2008). Patogen *L. theobromae* dilaporkan dapat menyebabkan berbagai penyakit seperti dieback, busuk akar, busuk buah, bercak daun, dan sapu penyihir (Punithalingam, 1980). Kerusakan akibat serangan patogen ini dapat menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan, menurunkan produksi pertanian, serta berdampak pada perekonomian dan ketahanan pangan masyarakat.

Dampak ekonomi yang ditimbulkan oleh *L. theobromae* bersifat multidimensi, mencakup degradasi kualitatif berupa diskolorisasi biji dan reduksi fraksi lipid yang menurunkan daya saing di pasar internasional (Valenzuela et al., 2023). Di Indonesia, kerugian kuantitatif dilaporkan mencapai rentang 10% hingga 30%, namun eskalasi kerugian hingga melampaui 50% sering terjadi pada ekosistem dengan kelembapan ekstrem dan manajemen sanitasi yang suboptimal (Rosmana et al., 2018; Suhendra & Winarno, 2024). Fenomena ini diperparah oleh dinamika iklim terkini yang meningkatkan virulensi patogen pada jaringan vaskular tanaman (Ramirez et al., 2022)."

Hasil survei lapangan menunjukkan bahwa penggunaan pestisida sintetis masih menjadi metode utama yang dipilih petani kakao dalam pengendalian penyakit. Namun, penyemprotan sering dilakukan secara berlebihan dan tidak tepat sasaran, bahkan melebihi dosis anjuran. Penggunaan pestisida sintetis yang tidak terkendali dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran tanah dan air, kematian organisme non-target, resistensi patogen, serta terganggunya keseimbangan ekosistem tanah (Okagu et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan alternatif yang lebih ramah lingkungan, yaitu penggunaan

pestisida hayati.

Berbagai penelitian *in vitro* telah dilakukan mulai dari tahap isolasi, identifikasi, dan seleksi mikroba hingga ditemukan beberapa isolat unggul yang berpotensi sebagai , biodekomposer, biofungisida dan Plant Growth Promoting Fungi (PGPF). Hasil skrining jamur pelapuk putih dan coklat terhadap limbah kulit kakao menunjukkan bahwa dari 25 isolat yang diuji, terdapat tiga isolat unggul, yaitu *P. ostreatus*, *T. harzianum*, dan *Lentinus torulosus* (Kuswinanti, 2012).

Trichoderma berperan ganda sebagai pengurai bahan organik dan agensi hayati. Beberapa spesies seperti *T. harzianum*, *T. viride*, dan *T. koningii* telah dilaporkan efektif menekan pertumbuhan patogen pada berbagai tanaman budidaya. Dominasi *Trichoderma* di tanah dapat menciptakan kondisi lingkungan yang lebih tahan terhadap perkembangan patogen (Prasetiyo, 2018). Mekanisme antagonistik *T. harzianum* meliputi antibiosis, kompetisi, mikoparasitisme, degradasi dinding sel patogen melalui enzim, serta induksi ketahanan tanaman (Lo, 1998; Xu & Jeffries, 2011). Selain itu, *T. harzianum* juga dikenal sebagai PGPF yang memiliki kemampuan lignoselulolitik dan dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman (Kuswinanti et al., 2010). Penelitian Kuswinanti dan Rosmana (2012) juga menunjukkan bahwa isolat *Trichoderma* sp., *Pseudomonas fluorescens*, dan *Bacillus* sp. mampu menghambat pertumbuhan *Phytophthora palmivora* secara *in vitro*.

Sementara itu, *P. ostreatus* merupakan jamur pelapuk putih yang memiliki tiga enzim lignolitik utama, laccase, mangan peroksidase (MnP), dan lignin peroksidase (LiP), yang berperan penting dalam degradasi lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Selain berperan sebagai dekomposer bahan organik, *P. ostreatus* juga diketahui memiliki aktivitas antagonistik terhadap berbagai patogen tanaman, termasuk *Phytophthora palmivora*. Mekanisme antagonisme jamur ini meliputi kompetisi ruang dan nutrisi, produksi enzim hidrolitik seperti kitinase dan β -1,3-glukanase, serta sekresi metabolit antijamur yang mampu menghambat pertumbuhan miselium patogen (Sharma et al., 2022).

Mikrobat merupakan konsorsium bakteri yang berperan mempercepat proses dekomposisi bahan organik dan menekan populasi mikroba patogen. Aplikasi Mikrobat pada limbah kakao dan sisa tanaman hasil sanitasi dapat mempercepat penguraian bahan organik sekaligus mengurangi sumber inokulum penyakit. Hasil dekomposisi limbah organik dapat dimanfaatkan kembali sebagai pupuk organik yang memperbaiki sifat fisik-kimia-biologi tanah dan umumnya meningkatkan produktivitas tanaman. Konsorsium mikroba yang digunakan sebagai aktivator pengomposan (sering disebut mikrobat) biasanya terdiri dari bakteri dan aktinobakteri fungsional (mis. *Pseudomonas fluorescens*, *Lactobacillus* spp., aktinomiset/ *Streptomyces*, dan *Bacillus subtilis*) yang berperan dalam dekomposisi bahan organik, pelarutan hara, dan perangsangan pertumbuhan tanaman (Liu et al., 2024). Mikrobat merupakan produk dari fakultas pertanian Universitas Hasanuddin, Makassar.

Pemanfaatan mikroorganisme perombak bahan organik merupakan alternatif

efektif untuk mempercepat dekomposisi dan menghasilkan kompos bermutu tinggi. Černohlávková et al. (2018) menyatakan bahwa jamur merupakan pengurai utama bahan organik dan berperan sebagai biodekomposer sekaligus biofungisida. Pemberian biodekomposer mempercepat proses pengomposan sehingga petani dapat memperoleh keuntungan melalui peningkatan produksi dengan kompos berkualitas. Namun, penerapan agen hayati di lapangan sering menghadapi kendala dalam hal media biakan dan bentuk sediaan. Formulasi dalam substrat padat seperti dedak padi, serbuk gergaji, atau tepung jagung memerlukan ruang penyimpanan besar dan kurang praktis untuk aplikasi lapangan (Teixidó et al., 2022).

Kendala utama dalam pemanfaatan mikroba pengendali hayati adalah formulasi yang belum optimal. Formulasi yang baik berfungsi sebagai habitat pelindung bagi mikroorganisme agar viabilitas, kemampuan kolonisasi, serta efektivitasnya di lapangan tetap tinggi (Tyagi et al., 2024). Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya menggunakan bentuk suspensi cair tanpa tambahan bahan perekat, sehingga stabilitas, daya simpan, dan kemudahan aplikasinya menjadi rendah. Selain itu, formulasi cair sering kali tidak mampu melindungi sel mikroba dari fluktuasi suhu dan kelembapan selama penyimpanan. Oleh karena itu, penelitian ini diawali dengan pengembangan formulasi bubuk yang lebih praktis dan dikemas dengan baik untuk menjaga viabilitas mikroba selama penyimpanan serta mendukung efektivitasnya sebagai agen hayati di lapangan.

Pengembangan formulasi bubuk berbasis bentonit berfungsi sebagai matriks pelindung sekaligus stabilisator spora *Trichoderma harzianum*. Melalui luas permukaan yang besar dan Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang tinggi, bentonit mampu mempertahankan kelembapan internal untuk menjaga stabilitas dormansi spora serta melindunginya dari oksidasi seluler dini. Secara teknis, integrasi bentonit meningkatkan kualitas fisik formulasi melalui optimalisasi daya rekat (*adherence*) pada inang dan peningkatan homogenitas dispersi spora dalam air. Sinergi ini secara signifikan memperpanjang masa simpan (*shelf-life*) dan mengamplifikasi efikasi biofungisida dalam mengendalikan patogen tular tanah.

Kemasan aluminium foil dinilai paling sesuai karena memiliki daya tahan tinggi, tidak mudah sobek, serta mampu melindungi produk dari cahaya, panas, dan kelembapan. Aluminium foil memiliki konduktivitas panas yang baik, permeabilitas rendah terhadap uap air dan gas, serta mampu menjaga kesegaran dan kestabilan mikroba dalam produk yang dikemas. Berdasarkan uraian tersebut, perlu dilakukan kajian pengembangan formulasi bubuk cendawan isolat *T. harzianum* dan *P. ostreatus* pada berbagai media biakan dan jenis kemasan, guna mengevaluasi viabilitas formulasi serta efektivitasnya sebagai, biodekomposer, biofungisida dan pemacu pertumbuhan tanaman kakao.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang formulasi bubuk *T. harzianum*, *P. ostreatus*
2. Bagaimana pengujian daya simpan setelah 2-12 minggu penyimpanan
3. Bagaimana efektivitas formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus* dalam

menurunkan intensitas penyakit *L. theobromae* ?

4. Bagaimana efektivitas formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus* dalam proses dekomposisi limbah perkebunan kakao dan pengaruh kompos hasil dekomposisi terhadap pertumbuhan bibit kakao?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk merancang komposisi formulasi bubuk *T. harzianum* dan *P. ostreatus*
2. Untuk menguji daya simpan formulasi setelah 1,2, dan 3 bulan penyimpanan.
3. Untuk menganalisis efektivitas formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus* dalam menurunkan intensitas penyakit *L. theobromae*
4. Untuk menganalisis efektifitas formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus* dalam proses penguraian limbah perkebunan kakao dan pengaruh kompos hasil dekomposisi terhadap pertumbuhan bibit kakao

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Kegiatan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Hama dan Penyakit Tanaman dan Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin dan kebun petani kakao di Kabupaten Soppeng. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu Tahapan pertama membuat formulasi bubuk *T. harzianum* dan *P. ostreatus*. Tahapan kedua adalah Uji Viabilitas formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus* setelah 2 hingga 12 minggu penyimpanan. Tahapan ketiga adalah uji biakan ganda pada media padat dan cair. Tahapan keempat adalah uji efektifitas formulasi cendawan *T. harzianum* dan *P. ostreatus* sebagai biofungisida dalam menurunkan intensitas penyakit *L. theobromae*. Tahap kelima adalah menguji efektifitas formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus* dalam proses dekomposisi limbah Perkebunan kakao dan pengaruh kompos hasil dekomposisi terhadap pertumbuhan bibit kakao.

1.5 Kebaharuan Penelitian (Novelty)

Kebaruan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Diperoleh data tentang bentuk dan komposisi formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus*
- 2) Diperoleh informasi tentang efektivitas kombinasi formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus* yang paling efektif untuk menurunkan intensitas penyakit *L. theobromae*
- 3) Diperoleh informasi tentang efektivitas kombinasi formulasi *T. harzianum* dan *P. ostreatus* yang paling efektif untuk pengomposan limbah kulit kakao dan pengaruh kompos hasil dekomposisi terhadap pertumbuhan bibit kakao

1.6 Daftar Pustaka

- Alves, A., Crous, P. W., Correia, A., and Phillips, A. L. (2008). Morphological and molecular data reveal cryptic speciation in *Lasiodiplodia theobromae*. *Fungal Diversity*, 28, 1–13.
- Badan Pusat Statistik (BPS). (2023). Produksi kakao Indonesia capai 667.300 ton pada 2022. Data Indonesia.id. <https://dataindonesia.id>
- Badan Pusat Statistik (BPS). (2001–2020). Statistik Kakao Indonesia. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- Černohlávková, J., Baldrian, P., & Šnajdr, J. (2018). Fungal role in the soil: decomposition, nutrient cycling and biological interactions. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 707. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00707>
- Goenadi, D. H., & Isroi. (2003). Aplikasi bioteknologi dalam upaya efisiensi agribisnis yang berkelanjutan. <http://www.ipard.com/artperkebun/dhgl.asp>.
- Huda-Shakirah, A. R., Mohamed Nor, N. M. I., Zakaria, L., Leong, Y. H., & Mohd, M. H. (2022). *Lasiodiplodia theobromae* as a causal pathogen of leaf blight, stem canker, and pod rot of *Theobroma cacao* in Malaysia. *Scientific Reports*, 12(1), 8966. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13057-9>
- International Cocoa Organization (ICCO). (2001–2020). *The World Cocoa Economy: Past and Present*. ICCO, London, UK.
- Kabelka, D., Konvalina, P., Kopecký, M., Klenotová, E., & Šíma, J. (2025). Assessment of soil organic matter and its microbial role at selected locations in the South Bohemia region (Czech Republic). *Land*, 14(1), 183. <https://doi.org/10.3390/land14010183>
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2024). *Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2023-2025*. Jakarta: Direktorat Jenderal Perkebunan.
- Kuswinanti, T., Rosmana, A., & Nasaruddin. (2010). Efektivitas penggunaan filtrat mikroba dari larutan bioaktivator untuk menekan pertumbuhan cendawan *Phytophthora palmivora*. Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Kuswinanti, T., Rosmana, A., & Rahim, A. (2012). Penanganan limbah tanaman kakao melalui pemanfaatan isolat putih dan coklat isolat lokal sebagai dekomposer. Laporan Penelitian Berbasis Prodi, Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Liu, Y., Lan, X., Hou, H., Ji, J., Liu, X., & Lv, Z. (2024). Multifaceted ability of organic fertilizers to improve crop productivity and abiotic stress tolerance: A review and perspectives. *Agronomy*, 14(6), 1141. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061141>
- Lo, C. T. (1998). General mechanisms of action of microbial biocontrol agents. *Plant Pathol Bulletin*, 7, 155–166.
- Nasaruddin. (2010). *Pemanfaatan Limbah Kakao*. Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Nivethadevi, P., Swaminathan, C., & Kannan, (2021). Soil organic matter decomposition: Roles, factors, and mechanisms. In *the Latest Trends in Soil Sciences* (Vol. 1, pp. 61-91). Integrated Publications
- Okagu I. U., Okeke E. S., Ezeorba W. C. F., Ndefo, J. C., & Ezeorba, T. P. C. (2023). Overhauling the ecotoxicological impact of synthetic pesticides using plants' natural products: A focus on *Zanthoxylum* metabolites. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(26), 67997–68021. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27258-w>

- Prasetyo, H., Purwati, P., & Arsensi, I. (2018). Pemanfaatan jamur *Trichoderma* sp. sebagai antagonis patogen busuk sultur tanaman buah naga merah (*Hylocereus polyrhizus*) secara in vitro. *Agrifarm: Jurnal Ilmu Pertanian*, 7(1), 19–27. <https://doi.org/10.24903/ajip.v7i1.2018>
- Punithalingam, E. (1980). *Plant Diseases Attributed to Botryodiplodia theobromae*. J. Cramer, Vaduz.
- Reijntjes, C., Haverkort, B., & Waters-Bayer, A. (1992). *Pertanian Masa Depan: Pengantar untuk Pertanian Berkelanjutan dengan Input Luar Rendah* (Terj. Y. Sukoco & S. S.). Kanisius, Yogyakarta.
- Sharma, R., Singh, D., & Sharma, S. (2022). Biocontrol potential of *Pleurotus* species against soil-borne phytopathogenic fungi: Mechanisms and applications. *Biocontrol Science and Technology*, 32(4), 403–417. <https://doi.org/10.1080/09583157.2022.2035093>
- Teixidó, N., Usall, J., & Torres, R. (2022). Insights into the successful development of biocontrol agents: production, formulation, packaging, and shelf life as key aspects. *Horticulturae*, 8(4), 305. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040305>
- Tyagi A, Tamang T., Kashtoh H., Mir R. A., Mir, Z. A., Manzoor, S., Manzar, N., Gani, G., Vishwakarma, S. K., Almalki, M. A., & Ali, S. (2024). A review on biocontrol agents as a sustainable approach for crop disease management: applications, production, and future perspectives. *Horticulturae*, 10(8), 805. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080805>
- Xu, X. M., Jeffries, P., Pautasso, M., & Jeger, M. J. (2011). A numerical study of the combined use of two biocontrol agents with different biocontrol mechanisms in controlling foliar pathogens. *Phytopathology*, 101(9), 1032–1044. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-10-0272>

BAB II

PENGEMBANGAN FORMULASI BUBUK *T. HARZIANUM* DAN *P. OSTREATUS* DENGAN MENGGUNAKAN BENTONIT

2.1 Abstrak

Pengembangan formulasi bubuk berbasis bentonit dapat meningkatkan viabilitas dan stabilitas mikroba antagonis, sehingga menjadi solusi berkelanjutan untuk biofungisida dan biodekomposer yang efektif dalam pengendalian patogen tanaman serta perbaikan kualitas tanah pada sistem pertanian modern. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pertumbuhan miselium *P. ostreatus* dan *T. harzianum* pada substrat beras, jagung, dan dedak, serta mengevaluasi daya simpan (viabilitas; cfu/g atau biomassa relatif) baik formulasi berbasis substrat tunggal maupun kombinasi selama 12 minggu penyimpanan. Isolat diinkubasi pada masing-masing substrat dan dinilai pertumbuhan visual pada minggu ke-1 (++ = 26–50% ; ++++ = kolonisasi penuh) selama 30 hari. Formulasi dibuat dari substrat terkolonisasi, lalu disimpan; viabilitas diuji tiap minggu ke-2, 4, 6, 8, 10, dan 12 dengan jumlah koloni ($\times 10^6$) melalui plating serial. Kombinasi substrat diuji dalam beberapa perbandingan 2:1:1, 1:2:1, dan 1:1:2 (beras:dedak: jagung). Hasil menunjukkan *P. ostreatus* menunjukkan kolonisasi seragam dan penuh (++++) pada ketiga substrat pada 30 hari (miselium putih padat sedangkan pada *T. harzianum* juga tumbuh cepat awalnya (++) tetapi menunjukkan ketergantungan substrat: kolonisasi penuh pada beras (++++), sedangkan pada jagung dan dedak hanya +++ (51–75%). Viabilitas selama 12 minggu menurun bertahap pada semua perlakuan; media beras mempertahankan cfu tertinggi untuk *T. harzianum* (25,67 \rightarrow 10,00 $\times 10^6$ dari minggu ke-2 ke-12) dibanding dedak (15,67 \rightarrow 4,00 $\times 10^6$) dan jagung (19,33 \rightarrow 9,33 $\times 10^6$). Formulasi kombinasi beras, dedak dan jagung(1;2;1) memberikan viabilitas terbaik untuk kedua spesies (mis. *T. harzianum* 26,00 \rightarrow 14,33 $\times 10^6$; sedangkan pada *P. Ostreatus* viabilitasnya 22,33 \rightarrow 10,00 $\times 10^6$ pada minggu ke-2 sampai ke-12). Penelitian ini menyimpulkan bahwa *P. ostreatus* bersifat adaptif luas terhadap berbagai substrat lignoselulosa; *T. harzianum* menunjukkan preferensi substrat (beras) dengan viabilitas simpan lebih baik pada media berpati. Formulasi kombinasi beras, dedak dan jagung (rasio 1:2:1) direkomendasikan untuk meningkatkan daya simpan dan efektivitas bioformulasi.

Kata Kunci: biokompos, daya simpan, formulasi bubuk, viabilitas

2.2 Pendahuluan

Pertanian dan produksi pangan merupakan sektor yang sangat penting dalam mendukung ketahanan pangan global. Seiring dengan pertumbuhan populasi dunia yang semakin pesat, kebutuhan akan pangan juga meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, pertanian sebagai sumber utama bahan pangan harus mampu beradaptasi dengan berbagai tantangan modern (Sharma, 2017). Salah satu tantangan terbesar adalah pengendalian hama dan penyakit tanaman yang sering

kali menyebabkan penurunan hasil panen secara signifikan. Selain itu, pengelolaan limbah organik di lahan pertanian juga menjadi isu penting karena akumulasi bahan organik yang tidak terdekomposisi dapat menurunkan kualitas tanah dan produktivitas tanaman. Untuk menghadapi kondisi tersebut, pertanian modern memerlukan solusi inovatif dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah pengembangan formulasi bubuk berbasis *T. harzianum* dan *P. ostreatus* yang berfungsi sebagai biodekomposer sekaligus biofungisida.

T. harzianum merupakan fungi yang dikenal memiliki kemampuan sebagai agen biokontrol yang efektif terhadap berbagai patogen tanaman. Fungi ini bekerja dengan cara mengkolonisasi rhizosfer tanaman, menghasilkan enzim-enzim yang mampu mendegradasi dinding sel patogen, serta merangsang pertumbuhan tanaman melalui produksi hormon dan zat pemacu tumbuh lainnya. Dengan demikian, penggunaan *T. harzianum* sebagai biopestisida menjadi alternatif yang lebih aman dan berkelanjutan dibandingkan pestisida kimia yang kerap menimbulkan efek negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Zhu, 2016). Sementara itu, *Pleurotus ostreatus* atau jamur tiram merupakan salah satu jamur yang paling banyak dibudidayakan di dunia karena nilai gizinya yang tinggi serta kemampuannya tumbuh pada berbagai substrat organik. Selain itu, *P. ostreatus* juga berperan penting dalam bioremediasi melalui kemampuan memecah lignin dan selulosa pada limbah pertanian, sehingga berkontribusi dalam mengurangi limbah sekaligus memperbaiki kualitas tanah (Zhang, 2018).

Kendala utama dalam pemanfaatan mikroba pengendali hayati terletak pada tahap formulasi. Formulasi yang tepat akan menyediakan habitat yang mampu melindungi mikroorganisme, sehingga meningkatkan potensi hidup dan kemampuan kolonisasinya (Boyetchko et al., 1999). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa aplikasi biopestisida dan biodekomposer umumnya masih menggunakan bentuk suspensi atau substrat tanpa tambahan bahan perekat dan pengisi, sehingga efektivitas dan daya simpannya terbatas. Dalam beberapa dekade terakhir, pendekatan bioteknologi telah banyak dikembangkan untuk menghasilkan formulasi aktif yang mengandung cendawan. Berbagai jenis bahan pembawa telah diteliti dengan penekanan pada pengaruhnya terhadap peningkatan umur simpan, viabilitas, dan kemanjuran produk akhir. Proses pengembangan formulasi bubuk melibatkan beberapa tahap penting, termasuk pemilihan strain unggul, produksi massa mikroorganisme, pengeringan, pencampuran dengan bahan pembawa yang sesuai, serta pengujian stabilitas dan efektivitas produk akhir. Dengan demikian, penelitian dan pengembangan intensif diperlukan untuk memastikan bahwa formulasi tersebut stabil selama penyimpanan dan tetap efektif saat diaplikasikan di lapangan.

Formulasi kering umumnya berbahan dasar mineral yang memiliki kapasitas retensi air tinggi, meskipun bubuk berbahan dasar biji-bijian juga terbukti efektif untuk budidaya massal dan sebagai bahan pembawa (Elshahawy et al., 2017). Keunggulan formulasi berbasis mineral terletak pada kesederhanaan proses pengembangan serta biaya produksi yang rendah. Oleh karena itu, kesederhanaan, efisiensi biaya, dan kemanjuran formulasi berbahan dasar mineral menjadikannya

sangat populer di pasar komersial. Beberapa formulasi kering yang umum digunakan untuk produk *Trichoderma* antara lain menggunakan bahan pembawa berbasis vermikulit atau biochar.

Bentonit merupakan salah satu jenis tanah liat halus berbentuk kepingan dengan komposisi utama SiO_2 $\pm 45\text{-}50\%$ (Naswir et al., 2013). Mineral ini dikenal mampu membentuk massa lengket ketika dicampur dengan air dan berfungsi sebagai bahan pengisi penguat. Penerapan bentonit telah terbukti dapat meningkatkan produksi enzim dan aktivitas mikroba bahkan di bawah kondisi kekeringan. Dengan demikian, bentonit berpotensi meningkatkan kesehatan tanah dan produktivitas tanaman dengan menjaga proses-proses penting dalam tanah serta mendukung siklus unsur hara. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa aplikasi bentonit pada tanah yang terdampak kekeringan dapat meningkatkan pertumbuhan dan keanekaragaman mikroba tanah (Liu, 2018).

Berdasarkan hal tersebut, pada tahap awal penelitian ini akan dilakukan pengembangan formulasi bubuk menggunakan bentonit sebagai bahan pembawa, yang kemudian akan dikemas dan diuji viabilitasnya setelah penyimpanan. Menurut Khan et al. (2023), formulasi mikroba umumnya terdiri atas bahan aktif, bahan makanan, bahan pembawa, dan bahan pencampur. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengembangan formulasi bubuk *T. harzianum* dan *Pleurotus ostreatus* agar dapat digunakan petani secara praktis, efisien, dan efektif. Melalui teknik formulasi yang tepat, produk ini diharapkan mudah diangkut dan diaplikasikan di lapangan, memiliki umur simpan lebih panjang, serta meningkatkan stabilitas dan efektivitas dalam pengendalian patogen maupun peningkatan pertumbuhan tanaman.

2.3 Metodologi Penelitian

2.3.1 Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Penyakit Tanaman, Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin. Penelitian ini berlangsung mulai bulan Juni 2024 sampai Oktober 2025

2.3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari Laminar Air Flow (LAF), Autoklaf, sentrifuse, spektrofotometer, timbangan digital, haemocytometer, mikroskop, blender, waterbath, pengaduk, cawan petri, spatula, gunting, jarum inoculum, ember, saringan, timbangan digital, kamera, sarung tangan dan alat tulis. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kultur isolat unggul yaitu *T. harzianum* dan *P. ostreatus*, media PDA, beras, jagung, dedak, Aquades, Alkohol, Kapas, Kentang, gula, bentonit, dan tepung tapioka.

2.3.3 Pelaksanaan Penelitian

a. Pembuatan Formulasi isolat *T. harzianum*, dan *P. ostreatus*

Isolat *T. harzianum* dan *P. ostreatus* diperbanyak terlebih dahulu pada media Potato Dextrose Agar (PDA) dan diinkubasi selama 3–5 hari pada suhu ruang (28–30°C) hingga miselium tumbuh merata. Koloni aktif dari masing-masing isolat kemudian diinokulasikan ke dalam tiga jenis media organik, yaitu beras, jagung, dan dedak, yang sebelumnya telah disterilisasi dua kali menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit dengan interval 24 jam. Masing-masing media dimasukkan ke dalam wadah steril dan diinokulasi dengan potongan miselium berukuran ± 1 cm². Inkubasi dilakukan selama 30 hari untuk mengamati kolonisasi miselium pada setiap substrat. Pertumbuhan diamati secara visual pada minggu pertama dan 30 hari inkubasi, meliputi tingkat pertumbuhan miselium (++ hingga +++) dan warna miselium, sebagai indikator aktivitas fisiologis jamur.

Setelah masa inkubasi selesai, kultur padat yang telah terkolonisasi penuh dikeringanginkan pada suhu ruang hingga kadar air rendah (<10%), kemudian dihancurkan menggunakan blender steril. Hasil bubuk inokulum dicampurkan dengan bentonit dan tepung tapioka steril sebagai bahan pembawa dengan perbandingan 1:2:2 (inokulum:bentonit:tapioka). Campuran diayak halus hingga homogen, kemudian dikeringkan kembali di lemari pengering (suhu 40°C) sampai kadar kelembaban stabil di bawah 10%, lalu dikemas dalam plastik aluminium foil steril. Adapun media yang digunakan adalah media beras, dedak dan jagung dan kombinasi ketiga media tersebut.

Pengembangan formulasi dilakukan menggunakan isolat tunggal *Trichoderma harzianum* dan *Pleurotus ostreatus*, serta kombinasi media pembawa dengan variasi perbandingan komposisi. Media pembawa yang diuji terdiri dari beras, dedak, dan jagung dengan perbandingan spesifik, yakni 2:1:1 (B2D1J1), 1:2:1 (B1D2J1), dan 1:1:2 (B1D1J2). Setiap kombinasi substrat tersebut diinokulasi secara terpisah dengan *T. harzianum* dan *P. ostreatus*. Seluruh sediaan dikemas secara aseptik dalam aluminium foil steril seberat ± 100 g per kemasan, kemudian diinkubasi pada suhu (28–31°C). Pengamatan dilakukan secara periodik selama 12 minggu dengan interval pengamatan pada minggu ke-2, 4, 6, 8, 10, dan 12 untuk mengevaluasi perubahan populasi jamur dan stabilitas viabilitas isolat dalam media tersebut.

b. Uji Daya Simpan Formulasi setelah 1, 2, dan 3 Bulan Penyimpanan

Uji viabilitas dilakukan untuk menentukan daya simpan dan populasi konidia (cfu/g) selama penyimpanan. Sebanyak 1 gram sampel dari masing-masing formulasi diambil secara aseptik, kemudian dimasukkan ke dalam tabung reaksi berisi 9 ml air steril. Suspensi dihomogenkan menggunakan vortex dan dilakukan pengenceran bertingkat hingga 10^{-6} . Dari pengenceran 10^{-6} , sebanyak 100 μ l suspensi diinokulasikan pada media PDA steril dan diratakan dengan *L-spreader*. Setiap perlakuan diulang tiga kali. Inkubasi dilakukan selama 24 jam pada suhu

ruang, kemudian dihitung jumlah koloni yang tumbuh aktif dan diamati kemungkinan adanya kontaminan. Populasi jamur dihitung menggunakan rumus:

$$P = \sum N \times TP \times 10$$

Keterangan:

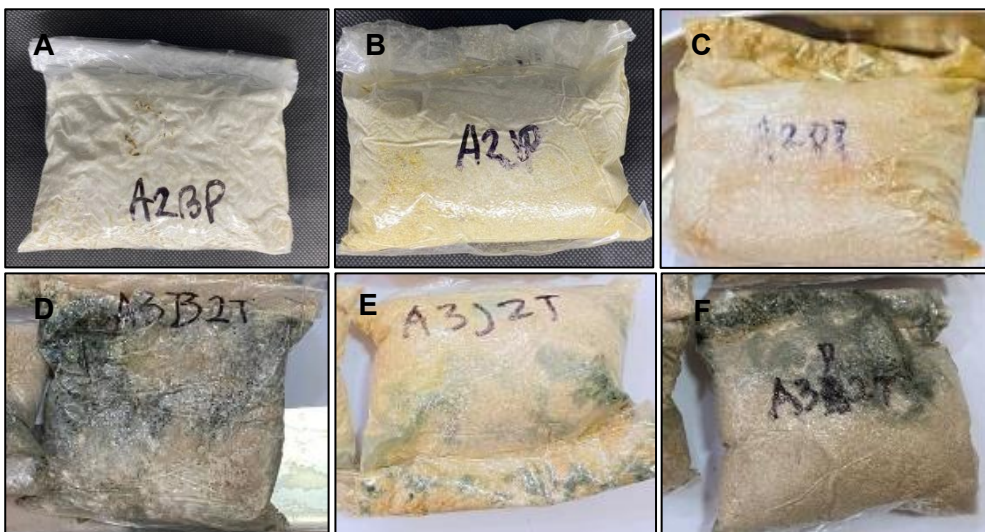
- P = Jumlah koloni (cfu/g);
 $\sum N$ = Total koloni terhitung;
 TP = Tingkat pengenceran;
 10 = Konstanta.

Formulasi dianggap masih layak dan stabil apabila populasi konidia tetap $\geq 10^5$ cfu/g setelah penyimpanan. Data hasil pengamatan kemudian digunakan untuk menilai laju penurunan populasi, membandingkan efektivitas substrat tunggal dan kombinasi, serta menentukan media terbaik untuk mempertahankan viabilitas *T. harzianum* dan *P. ostreatus* selama penyimpanan.

2.4 Hasil dan Pembahasan

2.4.1 Pertumbuhan Jamur Pada Berbagai Substrat Uji

Pertumbuhan *P. ostreatus* dan *T. harzianum* menunjukkan kemampuan kolonisasi miselium yang baik pada ketiga jenis substrat (beras, jagung, dan dedak), baik pada minggu pertama maupun setelah 30 hari inkubasi (Tabel 1–3). Pada minggu pertama inkubasi, kedua isolat menampilkan pertumbuhan sedang (++) , yang setara dengan kolonisasi permukaan 26%–50%. Miselium *P. ostreatus* tampak berwarna putih terang dan halus, sedangkan *T. harzianum* memperlihatkan warna putih kehijauan yang menandakan awal pembentukan konidia. Setelah 30 hari, *P. ostreatus* mencapai kolonisasi penuh (++++) pada seluruh media, ditandai dengan pertumbuhan miselium padat berwarna putih yang menutupi permukaan substrat secara merata (Gambar 1).



Gambar 1. Pertumbuhan *T. Harzianum* dan *P. ostreatus* pada berbagai media substrat. A. Media Beras + *P. ostreatus* ; B. Media Jagung + *P. Ostreatus*; C. Media Dedak + *P. ostreatus* ,D. Media Beras + *T. harzianum* E. Media Jagung + *T. harzianum* (); F. Media Dedak + *T. harzianum*

Sebaliknya, *T. harzianum* menunjukkan pola pertumbuhan yang sedikit berbeda antar substrat. Pada substrat beras, jamur ini mampu mencapai kolonisasi penuh (++++) dengan miselium berwarna hijau akibat pembentukan konidia matang. Namun, pada substrat jagung dan dedak, tingkat pertumbuhannya sedikit lebih rendah (+++), setara dengan kolonisasi 51%–75%. Perbedaan ini menunjukkan adanya pengaruh komposisi kimia substrat terhadap aktivitas enzimatik dan kecepatan kolonisasi *T. harzianum*.

Pertumbuhan *P. ostreatus* yang relatif seragam pada ketiga substrat mengindikasikan kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai sumber lignoselulosa. Hal ini berkaitan dengan kapasitas enzimatik *P. ostreatus* yang luas, termasuk produksi lignin peroksidase, mangan peroksidase, dan lakkase, yang berperan penting dalam degradasi lignin dan selulosa kompleks (Janusz et al., 2017; Elisashvili et al., 2008). Sementara itu, *T. harzianum* menunjukkan pertumbuhan yang lebih bergantung pada jenis substrat, mencerminkan spesialisasi enzimatik dan strategi kompetitifnya terhadap sumber karbon tertentu (Harman et al., 2004)

Tabel 1. Parameter pertumbuhan isolat jamur pada substrat beras

Isolat	Pertumbuhan (1 minggu inkubasi)	Warna miselium (1 minggu)	Pertumbuhan (30 hari inkubasi)	Warna miselium (30 hari)
<i>P. ostreatus</i>	++ (Sedang)	Putih	++++ (merata)	Putih
<i>T. harzianum</i>	++ (Sedang)	Putih Kehijauan	++++ (merata)	Hijau

Table 2. Parameter pertumbuhan isolat jamur pada substrat jagung

Isolat	Pertumbuhan (1 minggu inkubasi)	Warna miselium (1 minggu)	Pertumbuhan (30 hari inkubasi)	Warna miselium (30 hari)
<i>P. ostreatus</i>	++ (sedang)	Putih	++++ (merata)	Putih
<i>T. harzianum</i>	++ (sedang)	Putih kehijauan	+++ (merata)	Hijau

Tabel 3. Parameter pertumbuhan isolat jamur pada substrat dedak

Isolat	Pertumbuhan (1 minggu inkubasi)	Warna miselium (1 minggu)	Pertumbuhan (30 hari inkubasi)	Warna miselium (30 hari)
<i>P. ostreatus</i>	++ (sedang)	Putih	++++ (merata)	Putih
<i>T. harzianum</i>	++ (sedang)	Hijau muda	+++ (merata)	Hijau

Substrat beras (pati/karbohidrat sederhana) memberikan sumber energi cepat yang mendukung pertumbuhan miselium dan kolonisasi oleh *Trichoderma*, sedangkan substrat yang kaya lignoselulosa (mis. jagung, dedak) lebih sulit diuraikan sehingga sering menurunkan laju degradasi awal; komponen lipid/daging (fat) yang

lebih tinggi pada beberapa substrat agro-industri juga dapat memengaruhi proses fermentasi/degradasi dan memerlukan adaptasi enzimatik lebih lanjut (Xia & Lin, 2022).

Pertumbuhan miselium yang spesifik terhadap berbagai substrat menyoroti kemampuan adaptasi ekologis dan keragaman fungsional kedua jenis jamur ini. *P. ostretus* mampu mengkolonisasi kedua substrat dengan efisien berkat sifat saprotrofiknya, kelengkapan enzimatik yang luas, serta kemampuannya dalam mendegradasi senyawa lignoselulosa yang kompleks. Sebaliknya, *T. harzianum* menunjukkan pertumbuhan yang bergantung pada jenis substrat, yang mencerminkan spesialisasi enzimatik, alokasi metabolit sekunder yang terarah, serta strategi kompetitif dalam lingkungan dengan sumber daya terbatas (Contreras-Cornejo et al. 2016; Sindhu et al. 2016; Borkertas et al. 2025; Tut et al. 2021). Perbedaan ini menegaskan pentingnya pemilihan dan pencocokan mikroba dekomposer dengan jenis substrat organik tertentu untuk memaksimalkan efisiensi dekomposisi, mempercepat siklus hara, dan meningkatkan kualitas kompos dalam sistem pengelolaan limbah berkelanjutan.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa *P. ostretus* bersifat lebih ekstensif dalam pemanfaatan substrat lignoselulosa, sedangkan *T. harzianum* lebih adaptif pada substrat dengan kandungan pati tinggi seperti beras. Temuan ini sejalan dengan laporan sebelumnya bahwa pertumbuhan jamur pelapuk kayu sangat dipengaruhi oleh kandungan lignin, selulosa, dan hemiselulosa substrat, serta keseimbangan antara ketersediaan nitrogen dan karbon (Janusz et al., 2017).

2.4.2 Daya Simpan Formulasi

Daya simpan formulasi dievaluasi berdasarkan kestabilan populasi propagul hidup selama penyimpanan pada kondisi terkontrol (Gambar 2.)



Gambar 2. Formulasi Bubuk *T. harzianum* dan *P. Ostretus*

Untuk mengevaluasi stabilitas dan efektivitas berbagai komposisi matriks pembawa dalam mempertahankan viabilitas agen hayati, dilakukan penghitungan kerapatan spora secara periodik. Hasil pengamatan terhadap densitas koloni hidup selama masa simpan pada suhu ruang terangkum dalam tabel di bawah ini."

Tabel 4. Kerapatan Spora *T. Harzianum* setelah penyimpanan 2-12 minggu

Minggu	Perlakuan / Media Tumbuh		
	(Dedak)	(Beras)	(Jagung)
2	15,67 x 10 ⁶ d	25,67 x 10 ⁶ d	19,33 x 10 ⁶ d
4	11,33 x 10 ⁶ c	23,00 x 10 ⁶ cd	17,33 x 10 ⁶ cd
6	8,67 x 10 ⁶ bc	19,00 x 10 ⁶ bcd	15,00 x 10 ⁶ bcd
8	7,67 x 10 ⁶ b	16,67 x 10 ⁶ abc	13,33 x 10 ⁶ abc
10	6,00 x 10 ⁶ ab	14,33 x 10 ⁶ ab	11,67 x 10 ⁶ ab
12	4,00 x 10 ⁶ a	10,00 x 10 ⁶ a	9,33 x 10 ⁶ a

Keterangan : Angka-angka yang diikuti oleh huruf kecil yang tidak sama adalah berbeda nyata menurut hasil BNJ pada taraf 5%.

Berdasarkan pengamatan selama 12 minggu (Tabel 4–7), kedua isolat jamur menunjukkan pola penurunan jumlah populasi spora atau propagul aktif seiring bertambahnya waktu penyimpanan. Namun, laju penurunan dan kestabilan populasinya bervariasi tergantung pada jenis substrat maupun komposisi campuran media. Pada media tunggal, *T. harzianum* memperlihatkan kerapatan spora tertinggi pada minggu ke-2 hingga ke-4 pada media beras (25,67×10⁶ dan 23,00×10⁶ CFU), diikuti jagung (19,33×10⁶–17,33×10⁶ CFU), dan terendah pada dedak (15,67×10⁶–11,33×10⁶ CFU). Penurunan populasi secara bertahap terjadi mulai minggu ke-6 hingga ke-12, dengan nilai akhir masing-masing 10,00×10⁶ (beras), 9,33×10⁶ (jagung), dan 4,00×10⁶ (dedak). Hasil tersebut menunjukkan bahwa beras adalah media yang paling mendukung kelangsungan hidup dan aktivitas metabolik *T. harzianum* selama penyimpanan. Pola ini selaras dengan karakter fisiologis *T. harzianum* yang lebih efisien memanfaatkan karbohidrat sederhana dan pati dibandingkan lignoselulosa kompleks (Escalante et al., 2022).

Tabel 5. Kerapatan Spora *Pleorotus ostreatus* setelah penyimpanan 2-12 minggu

Minggu	Perlakuan / Media Tumbuh		
	(Dedak)	(Beras)	(Jagung)
2	12,33 x 10 ⁶ bcd	17,00 x 10 ⁶ bcde	14,00 x 10 ⁶ de
4	11,00 x 10 ⁶ c	15,33 x 10 ⁶ abc	16,67 x 10 ⁶ abc
6	11,00 x 10 ⁶ de	13,67 x 10 ⁶ cde	15,67 x 10 ⁶ abcd
8	9,33 x 10 ⁶ cd	12,33 x 10 ⁶ cd	11,67 x 10 ⁶ cd
10	7,67 x 10 ⁶ cd	10,33 x 10 ⁶ bcd	9,00 x 10 ⁶ cd
12	6,33 x 10 ⁶ cde	9,00 x 10 ⁶ bcd	5,67 x 10 ⁶ de

Keterangan : Angka-angka yang diikuti oleh huruf kecil yang tidak sama adalah berbeda nyata menurut hasil BNJ pada taraf 5%.

Pada perlakuan *P. ostreatus* pada media tunggal menunjukkan populasi awal yang lebih rendah dibanding *T. harzianum*, dengan kisaran 12,33×10⁶–17,00×10⁶ CFU pada minggu ke-2, dan cenderung menurun stabil hingga minggu ke-12. Media beras kembali menghasilkan nilai tertinggi (9,00×10⁶ CFU pada minggu ke-12),

sementara dedak menunjukkan penurunan paling tajam ($6,33 \times 10^6$ CFU). Meskipun demikian, *P. ostreatus* memperlihatkan kemampuan mempertahankan koloni aktif lebih konsisten, menandakan stabilitas fisiologis yang baik dalam kondisi penyimpanan jangka panjang. Stabilitas ini dapat dikaitkan dengan kapasitas enzimatisnya yang luas (lignin peroksidase, mangan peroksidase, dan lakkase), yang memungkinkan degradasi substrat berenergi tinggi secara berkelanjutan (Janusz et al., 2017).

Tabel 6. Kerapatan spora *T. Harzianum* pada perlakuan kombinasi media

Minggu	Perlakuan		
	B2D1J1	B1D2J1	B1D1J2
2	$17,67 \times 10^6$ d	$26,00 \times 10^6$ c	$21,00 \times 10^6$ b
4	$15,33 \times 10^6$ cd	$23,67 \times 10^6$ c	$21,33 \times 10^6$ b
6	$12,33 \times 10^6$ bc	$20,33 \times 10^6$ bc	$21,00 \times 10^6$ b
8	$11,67 \times 10^6$ abc	$18,33 \times 10^6$ ab	$17,67 \times 10^6$ ab
10	$8,33 \times 10^6$ ab	$16,67 \times 10^6$ ab	$14,67 \times 10^6$ ab
12	$7,00 \times 10^6$ a	$14,33 \times 10^6$ a	$12,33 \times 10^6$ a

Keterangan : Angka-angka yang diikuti oleh huruf kecil yang tidak sama adalah berbeda nyata menurut hasil BNJ pada taraf 5%.

Tabel 7. Kerapatan spora *P. ostreatus* pada perlakuan kombinasi media

Minggu	Perlakuan		
	B2D1J1	B1D2J1	B1D1J2
2	$16,67 \times 10^6$ b	$22,33 \times 10^6$ d	$16,00 \times 10^6$ c
4	$13,00 \times 10^6$ ab	$20,67 \times 10^6$ cd	$14,67 \times 10^6$ bc
6	$18,33 \times 10^6$ b	$19,67 \times 10^6$ bcd	$14,67 \times 10^6$ bc
8	$17,67 \times 10^6$ b	$16,67 \times 10^6$ bc	$11,67 \times 10^6$ abc
10	$12,00 \times 10^6$ ab	$15,00 \times 10^6$ ab	$10,33 \times 10^6$ ab
12	$9,67 \times 10^6$ a	$10,00 \times 10^6$ a	$8,67 \times 10^6$ a

Keterangan : Angka-angka yang diikuti oleh huruf kecil yang tidak sama adalah berbeda nyata menurut hasil BNJ pada taraf 5%.

Pada perlakuan kombinasi dedak, beras dan jagung (Tabel 6–7), baik *T. harzianum* maupun *P. ostreatus* menunjukkan peningkatan performa yang signifikan dibanding media tunggal. Kombinasi B1D2J1 (beras1:dedak2:jagung1) memberikan hasil tertinggi bagi kedua spesies, dengan populasi mencapai $26,00 \times 10^6$ CFU (*T. harzianum*) dan $22,33 \times 10^6$ CFU (*P. ostreatus*) pada minggu ke-2, serta tetap tinggi hingga minggu ke-12 ($14,33 \times 10^6$ dan $10,00 \times 10^6$ CFU). Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan komposisi nutrisi antar-substrat mampu mendukung aktivitas enzimatik dan reproduksi jamur secara lebih efisien. Kandungan karbohidrat beras, protein dan lemak dedak, serta serat kompleks jagung membentuk ekosistem nutrisi yang lebih lengkap untuk pertumbuhan miselium dan pembentukan spora (Sapwarobol et al., 2021).

Secara umum, laju penurunan populasi kedua jamur mengikuti pola eksponensial menurun, menunjukkan fase transisi dari pertumbuhan aktif menuju dormansi selama penyimpanan formulasi. Perbedaan ketahanan antar-substrat dan antar-spesies berkaitan dengan strategi ekologis masing-masing jamur: *T. harzianum* lebih bersifat strategist dengan kolonisasi cepat dan penurunan populasi tajam, sedangkan *P. ostreatus* bersifat K-strategist dengan kolonisasi lebih lambat namun stabilitas hidup lebih panjang (Contreras-Cornejo et al., 2016; Tut et al., 2021).

Hasil ini menegaskan pentingnya pemilihan substrat dan perbandingan campuran yang tepat dalam formulasi biokompos berbasis jamur pelapuk kayu. Kombinasi substrat yang kaya karbohidrat dan lignoselulosa sedang (seperti pada perlakuan 1:2:1) terbukti optimal dalam mempertahankan viabilitas dan aktivitas biologis jamur selama penyimpanan. Dengan demikian, pendekatan ini dapat diterapkan dalam pengembangan bioformulasi kompos yang lebih tahan simpan dan efektif untuk dekomposisi bahan organik secara berkelanjutan (Borkertas et al., 2025).

2.5 Kesimpulan

Hasil penelitian mengindikasikan bahwa *P. ostreatus* menunjukkan pertumbuhan miselium yang cepat dan merata pada semua substrat (beras, jagung, dan dedak), dengan kolonisasi penuh dan warna miselium putih stabil hingga 30 hari. Sedangkan *T. harzianum* memperlihatkan pertumbuhan yang lebih bergantung pada jenis substrat, optimal pada beras dengan kolonisasi penuh dan warna hijau khas, namun sedikit lebih rendah pada jagung dan dedak. Selama penyimpan formulasi mulai 2-12 minggu, populasi kedua jamur menurun bertahap, tetapi viabilitas tertinggi dipertahankan pada media beras dan B1D2J1 (beras1:dedak2:jagung1). Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan nutrisi karbohidrat, protein, dan lignoselulosa mendukung kestabilan metabolisme jamur. Secara keseluruhan, *P. ostreatus* memiliki kemampuan adaptasi dan stabilitas jangka panjang yang lebih baik, sedangkan *T. harzianum* lebih efisien pada fase kolonisasi awal. Kombinasi substrat seimbang direkomendasikan sebagai formulasi terbaik untuk meningkatkan efisiensi dekomposisi dan ketahanan simpan biokompos berbasis jamur pelapuk kayu.

2.6 Daftar Pustaka

- Borkertas S, Viskelis J, Viskelis P, Streimikyte P, Gasiunaite U, Urbonaviciene D. 2025. Fungal biomass fermentation: Valorizing the food industry's waste. *Ferment* 11 (6): 351. DOI: 10.3390/fermentation11060351
- Boyetchko, S. M., Pedersen, E. A., Punja, Z. K., & Reddy, M. S. (1999). Formulation of biopesticides using microbial agents. In F. R. Hall & J. J. Menn (Eds.), *Biopesticides: Use and Delivery* (pp. 487–508). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4735-4_22
- Contreras-Cornejo HA, Macías-Rodríguez L, del-Val E, Larsen J. 2016. Ecological functions of *Trichoderma* spp. and their secondary metabolites in the rhizosphere: Interactions with plants. *FEMS Microbiol Ecol* 92 (4): fiw036. DOI: 10.1093/femsec/fiw036

- Elshahawy, I. E., Saied, N., Abd-El-Kareem, F., & Morsy, A. (2017). Biocontrol of onion white rot disease using formulated *Trichoderma* species on wheat bran powder. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 50(13–14), 150–166. <https://doi.org/10.1080/03235408.2016.1276423>
- Escalante, M. R. T., Acanto, R. B., Conlu, M. T. N., Langcoy, M. G. F., Lirazan, S. V., & Mario, J. A. B. (2022). Growth of *Trichoderma harzianum* using starch-based household kitchen waste. *International Research Journal of Science, Technology, Education, and Management*, 2(4), 114–123. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7563509>
- Escalante, M. R. T., Acanto, R. B., Conlu, M. T. N., Langcoy, M. G. F., Lirazan, S. V., & Mario, J. A. B. (2022). Growth of *Trichoderma harzianum* using starch-based household kitchen waste. *International Research Journal of Science, Technology, Education, and Management*, 2(4), 114–123. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7563509>
- Harman, G. E. (1991). *Trichoderma* spp., including *T. harzianum*, *T. viride*, *T. koningii*, and *T. hamatum*. Cornell University, Ithaca, NY, USA
- Janusz G, Pawlik A, Sulej J, Świdorska-Burek U, Jarosz-Wilkołazka A, Paszczyński A. 2017. Lignin degradation: Microorganisms, enzymes involved, genome analysis, and evolution. *FEMS Microbiol Rev* 41 (6): 941–962. DOI: 10.1093/femsre/fux049
- Khan, A., Zaidi, A., & Owais, M. (2023). Microbial bioformulation: Principles, components, and applications. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1270039>
- Liu, Z., He, Y., Zhang, Y., & Cao, X. (2018). Effects of bentonite on soil physical and chemical properties, nutrient uptake and rice yield. *Journal of Soils and Sediments*, 18(8), 2448–2458. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1955-2>
- Naswir, M., Arita, S., Marsi, & Salni. (2013). Characterization of Bentonite by XRD and SEM-EDS and Use to Increase pH and Color Removal, Fe and Organic Substances in Peat Water. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1(4), 313–317.
- Sapwarobol, S., Saphyakhajorn, W. (2021). Biological Functions and Activities of Rice Bran as a Functional Ingredient: A Review. *Nutr Metab Insights*. 14: 11786388211058559. doi: 10.1177/11786388211058559
- Sharma, P., & Kumar, V. (2017). Integrated pest management: A sustainable approach to crop protection. In P. Sharma (Ed.), *Agriculture and Environment: Perspectives on Sustainable Development* (pp. 45–58). Springer.
- Sindhu R, Binod P, Pandey A. 2016. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass: An overview. *Bioresour. Technol* 199:76–82. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.030
- Tut G, Magan N, Brain P, Xu X. 2021. Critical evaluation of two commercial biocontrol agents for their efficacy against *B. cinerea* under in vitro and in vivo conditions in relation to different abiotic factors. *Agronomy* 11 (9): 1868. DOI: 10.3390/agronomy11091868
- Xia, Y., & Lin, X. (2022). Efficient biodegradation of straw and persistent organic pollutants by recombinant *Trichoderma reesei* expressing laccase: enzyme production and solid-state fermentation performance. *Bioresources and Bioprocessing*, 9, 51. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00581-9>
- Zhang, J., & Zhang, N. (2018). Effects of *Pleurotus ostreatus* on the biodegradation of organic waste in agricultural fields. *Journal of Agricultural Science*, 10(3), 110–119. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n3p110>

Zhu, J., & Zhang, Z. (2016). Enhancement of soil fertility and crop yield by integrating *Trichoderma harzianum* in organic farming. *Sustainable Agriculture Research*, 5(2), 75–85. <https://doi.org/10.5539/sar.v5n2p75>

