

Dinamika Gejala Infeksi Awal dan Penurunan Viabilitas Formulasi Kering *Metarhizium anisopliae* Selama Penyimpanan Tropis

Nina Jeny Lapinangga¹, Yosefus F. da Lopez², Jacqueline Arriani Bunga³, Rupa Mateus⁴

^{1,3} Jurusan Tanaman Pangan dan Hortikultura, Politeknik Pertanian Kupang, Indonesia
^{2,4} Jurusan Manajemen Pertanian Lahan Kering, Politeknik Pertanian Kupang, Indonesia

¹Email: lanina06771@gmail.com

²Email: yosdapisco@gmail.com

³Email: jacquelinebunga@gmail.com

⁴Email: matheusrupa@yahoo.com

Submit : 24-07-2025

Revisi : 10-09-2025

Diterima : 02-10-2025

ABSTRACT

*This study aimed to evaluate the effect of storage duration on the early mortality and infection symptom progression of *Cylas formicarius* exposed to dry powder formulations of *Metarhizium anisopliae*. Formulations were stored at room temperature for 1-6 months and tested through a 120-hour bioassay. Observations included cumulative mortality and the progression of visible infection symptoms. The formulation stored for 1 month (P1) produced the highest cumulative mortality of 10.3% at 120 hours, accompanied by rapid symptom development from discoloration to early mummification. In contrast, the 3-month formulation (P3) exhibited normal symptom progression but resulted in slower mortality accumulation, reaching only 5.1% at 120 hours. Dual-axis analysis showed that mortality peaks corresponded to the melanization and mummification stages, indicating the onset of systemic fungal infection in treatments with higher conidial viability. These findings demonstrate that the pathogenic effectiveness of dry *M. anisopliae* formulations declines with increasing storage duration. Therefore, storage periods of no more than 1-2 months are recommended to maintain optimal performance as a biocontrol agent against *C. formicarius*.*

Keywords: Cumulative mortality, *Cylas formicarius*, Infection progression, *Metarhizium anisopliae*, Storage duration

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh lama penyimpanan formulasi kering *Metarhizium anisopliae* terhadap mortalitas awal dan progresi gejala infeksi pada imago *Cylas formicarius*. Formulasi disimpan pada suhu ruang selama 1-6 bulan dan diuji melalui bioefikasi selama 120 jam pasca-inokulasi. Parameter yang diamati meliputi mortalitas kumulatif dan perkembangan gejala infeksi berdasarkan perubahan morfologis serangga. Hasil menunjukkan bahwa formulasi dengan lama simpan 1 bulan (P1) menghasilkan mortalitas tertinggi sebesar 10,3% pada 120 jam, dengan progresi gejala yang cepat dari *discoloration* hingga mumifikasi. Sebaliknya, formulasi yang disimpan selama 3 bulan (P3) memperlihatkan perkembangan gejala yang masih berlangsung normal, namun mortalitas meningkat lebih lambat dan hanya mencapai 5,1%. Korelasi antara progresi gejala dan mortalitas memperlihatkan bahwa lonjakan kematian terutama terjadi pada fase melanisasi hingga mumifikasi, menandakan keberhasilan infeksi sistemik pada formulasi dengan viabilitas konidia yang lebih tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas formulasi kering *M. anisopliae* menurun seiring meningkatnya lama simpan, dan penyimpanan optimal disarankan tidak lebih dari 1-2 bulan untuk mempertahankan kinerja sebagai agen pengendali hayati *C. formicarius*.

Kata kunci: *Cylas formicarius*, Lama simpan, *Metarhizium anisopliae*, Mortalitas kumulatif, Progresi gejala.

1 Pendahuluan

Ubi jalar (*Ipomoea batatas L.*) merupakan salah satu komoditas pangan strategis di berbagai wilayah tropis, termasuk Indonesia, karena mempunyai nilai ekonomi tinggi, adaptasi luas, dan peran penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Produktivitas dan kualitas umbi sangat rentan menurun akibat gangguan organisme pengganggu tanaman, terutama serangan kumbang penggerek *Cylas formicarius*, yang dikenal sebagai hama utama baik di lahan maupun pascapanen. Imago maupun larvanya membuat lubang pada umbi dan batang sehingga menyebabkan kerusakan fisik yang signifikan, penurunan nilai jual, serta membuka peluang bagi infeksi patogen sekunder. Serangan berat dapat menurunkan hasil secara drastis hingga mencapai 100% apabila tidak ditangani dengan baik (Bayu & Prayogo, 2016).

Upaya pengendalian *C. formicarius* selama ini sebagian besar masih bergantung pada insektisida sintetik. Meskipun efektif dalam jangka pendek, penggunaan insektisida kimia terus-menerus menimbulkan berbagai masalah seperti resistensi hama, pencemaran lingkungan, residu kimia pada bahan pangan, serta terganggunya keseimbangan ekosistem (Manikome, 2021). Alternatif pengendalian yang lebih ramah lingkungan telah banyak dikaji, misalnya pestisida nabati dari daun mimba, sirsak, anona, sirih, dan babadotan yang terbukti mampu menyebabkan mortalitas larva di atas 50% dalam kondisi laboratorium (Lapinangga et al., 2022a). Namun demikian, efektivitasnya masih cenderung variatif dan seringkali kurang stabil di lapangan. Dengan demikian, diperlukan teknologi pengendalian hayati yang lebih konsisten dan berkelanjutan.

Jamur entomopatogen *Metarhizium anisopliae* menjadi salah satu agen pengendali hayati yang menjanjikan karena memiliki spektrum inang yang luas serta mekanisme infeksi yang efisien. Proses infeksi dimulai dari melekatnya konidia pada permukaan kutikula serangga, diikuti penetrasi menggunakan enzim hidrolitik, perkembangan miselium di dalam hemocoel, serta produksi metabolit toksik yang merusak jaringan tubuh inang (Litwin et al., 2020; Syazwan et al., 2021). Berbagai studi menunjukkan tingginya potensi *Metarhizium sp.* dalam pengendalian hama. *Metarhizium sp.* B2.2, misalnya, dilaporkan memiliki toksisitas sangat tinggi terhadap rayap dengan mortalitas mencapai 100% pada hari kedua pengujian, menjadikannya kandidat potensial untuk dikembangkan sebagai biopestisida dengan memanfaatkan substrat padi atau sorgum sebagai pembawa (Zulfiana et al., 2020). Jamur ini juga tumbuh optimal pada media dedak padi, dengan persentase pertumbuhan mencapai 100% (Sonbai & Lapinangga, 2023), sehingga mudah diproduksi dalam skala besar. Viabilitas tinggi pada formulasi tepung, yang dapat mencapai 84% (Lapinangga et al., 2022b), menunjukkan bahwa bentuk formulasi kering memiliki prospek baik untuk aplikasi lapangan. Selain itu, penambahan bahan seperti kitin 0,5% dapat

meningkatkan viabilitas dan virulensi sehingga memperkuat efektivitas infeksi terhadap serangga target (Lei et al., 2023).

Meskipun demikian, penerapan jamur entomopatogen dalam bentuk formulasi kering masih memiliki tantangan, terutama terkait kemampuan konidia mempertahankan viabilitas selama penyimpanan. Lingkungan tropis dengan suhu tinggi dan kelembapan fluktuatif dapat mempercepat degradasi konidia, menyebabkan penurunan virulensi, keterlambatan infeksi, serta berkurangnya mortalitas serangga target. Penurunan viabilitas ini dapat terjadi karena membran konidia mengalami kerusakan struktural atau kehilangan cairan akibat kondisi penyimpanan yang kurang optimal (Quesada-Moraga et al., 2023). Selain itu, performa setiap galur jamur dapat berbeda-beda dalam toleransi terhadap kondisi penyimpanan, sehingga pemilihan galur dengan ketahanan lingkungan yang baik menjadi faktor penting dalam menjaga efektivitas formulasi (Mantzoukas et al., 2023).

Sebagian besar penelitian sebelumnya menilai efektivitas *M. anisopliae* melalui parameter mortalitas akhir, nilai LT_{50} , atau pengukuran patogenisitas jangka panjang. Pendekatan tersebut memang memberikan gambaran umum mengenai potensi biokontrol, namun belum sepenuhnya menggambarkan dinamika infeksi pada fase awal setelah inokulasi, yang justru menjadi indikator sensitif aktivitas konidia. Gejala awal seperti *discoloration*, pelunakan segmental, perubahan warna integumen, hingga awal mumifikasi merupakan indikator penting yang mencerminkan kemampuan konidia berkecambah dan memulai invasi jaringan inang. Parameter ini sering kali menunjukkan perubahan lebih cepat dibandingkan mortalitas dalam 120 jam pertama, sehingga dapat dijadikan dasar evaluasi kesegaran formulasi serta kualitas penyimpanan.

Sebagian besar penelitian jamur entomopatogen masih mengevaluasi efektivitas berdasarkan mortalitas atau nilai LT_{50} , sehingga dinamika infeksi awal sebelum kematian belum tergambarkan secara memadai. Oleh karena itu, penelitian ini merupakan pendekatan kuantitatif baru dalam mengevaluasi infeksi awal jamur entomopatogen, melalui integrasi parameter laju progresi gejala (Δ ISSI) dan onset gejala berbasis ambang ISSI

Lama penyimpanan formulasi kering *M. anisopliae* diduga berpengaruh terhadap kemampuan konidia dalam memicu infeksi awal pada imago *C. formicarius* serta menginduksi mortalitas pada periode pengamatan awal hingga 120 jam. Penelitian ini memfokuskan pengamatan pada perkembangan gejala infeksi sebagai dasar untuk menggambarkan kronologi proses infeksi dan mengevaluasi patogenisitas jamur pada berbagai lama penyimpanan formulasi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi praktis mengenai batas optimal masa simpan formulasi kering *M. anisopliae* agar tetap efektif sebagai bioinsektisida, sekaligus memperkaya pemahaman ilmiah mengenai

dinamika infeksi awal jamur entomopatogen dalam pengendalian hayati hama *C. formicarius* yang aman, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

2 Metode Penelitian

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Hama Terpadu, Politeknik Pertanian Negeri Kupang, yang dilengkapi fasilitas kultur jamur serta ruang pemeliharaan serangga dengan kondisi semi-terkontrol. Kegiatan penelitian berlangsung pada Mei-September 2025. Suhu ruang laboratorium berkisar 27-30 °C dengan kelembapan relatif mengikuti kondisi iklim tropis setempat.

Bahan dan Peralatan

Bahan utama terdiri atas isolat lokal *M. anisopliae* yang sebelumnya diperbanyak pada media PDA, serta imago *C. formicarius* yang dikumpulkan dari pertanaman ubi jalar dan diadaptasikan selama 24 jam sebelum pengujian. Media *Potato Dextrose Agar* (PDA) digunakan untuk propagasi konidia, sedangkan formulasi kering dibuat menggunakan substrat beras bekatul steril sebagai bahan pembawa. Substrat campuran beras bekatul steril digunakan sebagai bahan pembawa dalam pembuatan formulasi kering. Pemilihan dedak padi didasarkan pada kemampuannya mendukung pertumbuhan jamur entomopatogen. Peralatan yang digunakan mencakup inkubator, laminar airflow, mikroskop cahaya, haemocytometer, timbangan digital, cawan petri, desikator, wadah uji plastik, serta kamera digital untuk dokumentasi gejala infeksi.

Pembuatan Formulasi Kering

Isolat *M. anisopliae* diinkubasikan pada media PDA selama 14 hari hingga menghasilkan konidia matang. Konidia dipanen dan diinokulasikan ke substrat beras bekatul steril, kemudian diinkubasi sampai substrat terkolonisasi penuh. Biomassa yang terbentuk dikeringkan secara aseptik, digiling, dan diayak hingga diperoleh bubuk formulasi homogen. Formulasi disimpan dalam wadah tertutup pada suhu ruang selama 1-6 bulan untuk menghasilkan enam tingkat perlakuan lama simpan.

Rancangan Percobaan

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan satu faktor, yaitu lama penyimpanan formulasi (P1-P6 = 1, 2, 3, 4, 5, dan 6 bulan). Setiap perlakuan terdiri atas empat ulangan; tiap ulangan berisi 10 imago *C. formicarius*. Total serangga uji sebanyak 240 ekor.

Uji Bioefikasi

Sebanyak 0,5 g formulasi kering ditempatkan dalam wadah uji plastik. Sepuluh imago dilepaskan ke dalam wadah dan dibiarkan berinteraksi langsung dengan formulasi

tanpa penambahan pakan. Wadah uji ditempatkan pada suhu ruang laboratorium selama periode pengamatan 120 jam.

Pengamatan

Pengamatan dilakukan setiap 24 jam selama 120 jam, meliputi:

1. Mortalitas kumulatif: jumlah serangga mati dicatat setiap interval.
2. Gejala infeksi: perubahan morfologi integumen diamati secara visual dan didokumentasikan. Gejala yang dicatat meliputi tidak ada perubahan, *discoloration*, pelunakan tubuh, melanisasi, mumifikasi awal.
3. Penyusunan *Infection Symptom Severity Index* (ISSI): setiap tahap gejala diberi skor numerik (0-10) yang kemudian digunakan untuk menghitung Δ ISSI (laju progresi gejala), menentukan onset gejala berdasarkan ambang ISSI ≥ 1 , ≥ 3 , ≥ 4 , dan ≥ 5 .
4. Parameter tambahan: integrasi ISSI dengan mortalitas kumulatif untuk menilai hubungan antara gejala awal dan infeksi sistemik.

Analisis Data

Mortalitas dikoreksi menggunakan persamaan Abbott untuk menghilangkan pengaruh mortalitas alami. ISSI dianalisis secara deskriptif untuk menghasilkan: Δ ISSI (perubahan skor antar-interval 24 jam), onset gejala per tahap berdasarkan ambang ISSI, dan pola progresi gejala untuk setiap perlakuan. Seluruh hasil disajikan dalam bentuk tabel dan grafik dual-axis untuk menampilkan hubungan antara progresi gejala dan mortalitas kumulatif. Metode ini memungkinkan evaluasi yang lebih mendalam terhadap dinamika infeksi awal sebelum kematian terjadi, sehingga melengkapi analisis mortalitas tradisional yang umum digunakan pada studi bioefikasi jamur entomopatogen.

3 Hasil dan Pembahasan

Mortalitas Kumulatif Imago *C. formicarius*

Mortalitas 120 jam menunjukkan pola penurunan efektivitas seiring bertambahnya lama penyimpanan (Tabel 1). Formulasi 1 bulan menghasilkan mortalitas tertinggi, sementara formulasi 6 bulan paling rendah.

Tabel 1. Data Mortalitas imago *C. formicarius* per interval waktu

Waktu (jam)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0-24	1,2	1,0	0,8	0,4	0,3	0,2
24-48	3,1	2,4	1,8	1,1	0,7	0,5
48-72	5,4	4,2	3,0	2,0	1,4	1,0
72-96	8,3	6,3	4,4	3,0	2,3	1,3
96-120	10,3	7,4	5,1	4,0	3,1	2,1

Lama penyimpanan formulasi kering *M. anisopliae* mempengaruhi secara nyata mortalitas *C. formicarius* dalam 120 jam. Formulasi yang disimpan selama satu bulan (P1) menghasilkan mortalitas tertinggi, sedangkan mortalitas menurun secara bertahap pada

perlakuan dengan lama simpan yang lebih panjang. Pola ini mengindikasikan bahwa penyimpanan pada suhu ruang tropis menyebabkan penurunan viabilitas konidia seiring waktu. Pada penyimpanan jangka pendek, konidia masih memiliki kemampuan germinasi dan infeksi yang baik, tetapi pada penyimpanan hingga enam bulan (P6), efektivitasnya menurun kemungkinan akibat paparan suhu dan kelembapan yang fluktuatif.

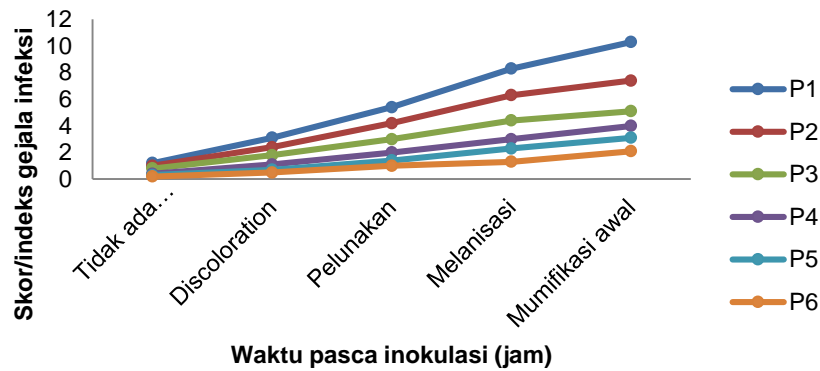
Menurut Ingle, (2016), suhu ruang dapat mempercepat degradasi konidia jamur entomopatogen. Viabilitas *Nomuraea rileyi* dapat dipertahankan lebih lama pada suhu rendah ($\pm 4^{\circ}\text{C}$) dan efektivitas masih terjaga hingga 150 hari. Formulasi *M. acridum* dapat bertahan hingga 30 bulan pada kondisi dingin (Ould Etheimine et al., 2013). Sebaliknya, penyimpanan pada suhu ruang mempercepat penurunan patogenesis *Beauveria bassiana*, meskipun konidia masih mampu bertahan hingga sekitar 180 hari (Das et al., 2013).

Penelitian (Irawan & Wibowo, 2015), kualitas formulasi kering *M. anisopliae* dan *Beauveria bassiana* yang lebih kompleks turut menentukan stabilitas konidia dan mampu meningkatkan kemampuan infeksi terhadap *Helopeltis spp.* Aplikasi jamur entomopatogen pada *C. formicarius* juga mampu menghasilkan mortalitas tinggi pada larva (>80%), meskipun efektivitas tersebut sangat dipengaruhi oleh mutu konidia dan kondisi lingkungan (Lapinangga & da Lopez, 2016). Inovasi formulasi dengan penambahan minyak berosmoprotektan (trehalosa) dapat memperpanjang masa simpan hingga 36,6 bulan (Garcia Riaño et al., 2022). Faktor lingkungan (cahaya dan agitasi) berpengaruh terhadap viabilitas, penyimpanan di tempat gelap dan minim gangguan dapat menjaga viabilitas lebih baik (Immediato et al., 2017). Penyimpanan dingin dapat menjaga stabilitas jangka panjang. Namun beberapa jenis formulasi dapat mempertahankan efektivitasnya tanpa pendinginan untuk penggunaan jangka pendek (Ould Etheimine et al., 2013).

Penelitian ini menunjukkan bahwa efektivitas jamur entomopatogen dipengaruhi oleh kerapatan konidia, viabilitas, dan integritas fisiologisnya. Makin tinggi proporsi konidia hidup, makin besar peluang infeksi awal yang kemudian memicu mortalitas (Prisilya et al., 2023). Formulasi yang disimpan terlalu lama pada suhu ruang cenderung mengalami penurunan kemampuan infeksi, yang tercermin dari rendahnya mortalitas pada perlakuan P5 dan P6.

Perkembangan Gejala Infeksi Imago *C. formicarius*

Gejala infeksi berkembang bertahap dan mengikuti pola umum infeksi jamur entomopatogen (Gambar 1). Formulasi dengan penyimpanan lebih pendek menimbulkan gejala lebih jelas.



Gambar 1. Grafik Progressi Gejala Infeksi Imago *C. formicarius* oleh *M. anisopliae*

Progresi gejala infeksi yang diamati pada penelitian ini mengikuti tahapan khas patogenesis jamur *M. anisopliae*. Fase awal ditandai dengan melekatnya konidia pada kutikula serangga melalui interaksi molekul adhesif dan eksopolisakarida, yang memungkinkan jamur menembus pertahanan permukaan inang (Shang et al., 2024). Setelah berhasil melakukan adhesi, konidia mengalami germinasi dan membentuk apresorium yang kemudian melakukan penetrasi aktif ke dalam integumen, proses yang difasilitasi oleh enzim hidrolitik seperti protease, lipase, dan kitinase (Karthi et al., 2024). Peran kitin sebagai faktor pendukung virulensi juga relevan, di mana penambahan tepung kitin terbukti meningkatkan viabilitas dan daya infeksi *M. anisopliae* terhadap *C. formicarius* (Lapinangga & da Lopez, 2018).

Tahap berikutnya ditandai dengan perkembangan hifa di dalam hemocoel, pembentukan *hyphal bodies*, serta produksi metabolit toksik yang merusak jaringan internal. Aktivitas ini berkontribusi pada munculnya gejala lanjutan seperti pelunakan tubuh, penggelapan (melanisasi), hingga mumifikasi, yang menjadi indikator infeksi sistemik. Jalannya infeksi progresif dalam rentang waktu sekitar 72 jam ini konsisten dengan temuan Mannino et al. (2021), yang menegaskan pentingnya kolonisasi hemocoel dan kerusakan jaringan oleh metabolit sekunder dalam menentukan keberhasilan infeksi.

Pola peningkatan gejala yang tercatat dalam penelitian ini mencerminkan rangkaian mekanistik infeksi *M. anisopliae*, mulai dari interaksi awal di permukaan kutikula hingga berkembangnya kerusakan sistemik pada jaringan internal serangga.

Laju Progresi Gejala (Δ ISSI)

Analisis Δ ISSI digunakan untuk menggambarkan kecepatan perubahan tingkat keparahan gejala infeksi pada setiap interval 24 jam (Tabel 2). Parameter ini memberikan gambaran yang lebih sensitif dibandingkan mortalitas karena menunjukkan dinamika infeksi sebelum serangga mengalami kematian. Secara umum, nilai Δ ISSI pada semua perlakuan menunjukkan pola peningkatan bertahap, namun dengan laju yang berbeda antar lama penyimpanan formulasi.

Tabel 2. Δ ISSI pada Setiap Interval Waktu untuk Perlakuan P1-P6

Interval ISSI	Δ ISSI P1	Δ ISSI P2	Δ ISSI P3	Δ ISSI P4	Δ ISSI P5	Δ ISSI P6
0-24 → 24-48	1,9	1,4	1,0	0,7	0,4	0,3
24-48 → 48-72	2,3	1,8	1,2	0,9	0,7	0,5
48-72 → 72-96	2,9	2,1	1,4	1,0	0,9	0,3
72-96 → 96-120	2,0	1,1	0,7	1,0	0,8	0,8

Pada perlakuan P1, laju progresi gejala menunjukkan nilai tertinggi dibanding perlakuan lain, dengan Δ ISSI sebesar 1.9 pada interval 0-24 → 24-48 jam, kemudian meningkat menjadi 2.3 dan mencapai puncak 2.9 pada 48-72 → 72-96 jam. Nilai ini mencerminkan kecepatan infeksi yang tinggi, konsisten dengan mortalitas yang meningkat tajam pada fase melanisasi hingga mumifikasi. Pola yang sama, meskipun sedikit lebih rendah, ditunjukkan pada P2 yang memiliki Δ ISSI berkisar antara 1.4-2.1. Kedua perlakuan ini merepresentasikan formulasi dengan viabilitas konidia yang masih optimal sehingga progresi infeksi berlangsung cepat.

Pada P3, Δ ISSI berada pada kisaran sedang (1.0-1.4), menunjukkan bahwa meskipun gejala tetap berkembang mengikuti tahapan infeksi jamur entomopatogen, lajunya lebih lambat dibanding P1 dan P2. Kondisi ini sejalan dengan penurunan mortalitas kumulatif pada P3, yang mengindikasikan penurunan kemampuan proliferasi jamur pada tubuh inang. Penurunan efektivitas pada P3 sejalan dengan penelitian Nuraida & Lubis (2016), lamanya penyimpanan berpengaruh signifikan terhadap stabilitas dan performa biopestisida berbasis *M. anisopliae*, di mana efektivitas tertinggi umumnya dicapai pada masa simpan awal. Perlakuan P4-P6 menunjukkan laju progresi gejala yang paling rendah, dengan Δ ISSI hanya 0.3-1.0. Nilai yang menurun ini memperkuat dugaan bahwa viabilitas konidia mengalami penurunan signifikan pada penyimpanan lebih lama, sehingga kecepatan perkembangan infeksi melambat dan tidak menghasilkan mortalitas tinggi dalam periode pengamatan.

Δ ISSI menunjukkan bahwa infeksi *M. anisopliae* tidak hanya dipengaruhi oleh kemampuan jamur menyebabkan kematian, tetapi dipengaruhi juga dengan kecepatan tahapan fisiologis yang dialami serangga. Formulasi dengan lama simpan lebih pendek (P1-P2) menunjukkan progresi gejala lebih cepat, menandakan viabilitas konidia yang tinggi dan aktivitas patogenik yang stabil. Sebaliknya, formulasi dengan penyimpanan lebih panjang (P4-P6) memperlihatkan perlambatan progresi gejala, yang mencerminkan kondisi konidia yang telah mengalami degradasi fisiologis meskipun masih mampu memicu infeksi ringan. Parameter Δ ISSI merupakan indikator efektif untuk mengevaluasi kinerja awal infeksi jamur entomopatogen dan dapat menjadi pelengkap penting bagi mortalitas dalam menilai efektivitas suatu formulasi bioinsektisida.

Onset Gejala per Tahap

Analisis onset gejala berdasarkan ambang ISSI memberikan gambaran temporal yang jelas mengenai kecepatan dan urutan munculnya tanda-tanda infeksi pada tiap perlakuan (Tabel 3).

Tabel 3. Onset Gejala per Tahap untuk P1-P6 (berdasarkan ambang ISSI)

Perlakuan	<i>Discoloration</i> (ISSI ≥ 1)	Pelunakan (ISSI ≥ 3)	Melanisasi (ISSI ≥ 4)	Mumifikasi awal (ISSI ≥ 5)
P1	0-24	24-48	48-72	48-72
P2	0-24	48-72	48-72	72-96
P3	24-48	48-72	72-96	96-120
P4	24-48	72-96	96-120	Tidak tercapai (≤ 120 jam)
P5	48-72	96-120	Tidak tercapai (≤ 120 jam)	Tidak tercapai (≤ 120 jam)
P6	48-72	Tidak tercapai (≤ 120 jam)	Tidak tercapai (≤ 120 jam)	Tidak tercapai (≤ 120 jam)

Discoloration (ISSI ≥ 1), sebagian besar perlakuan menunjukkan onset pada interval awal (0-24 atau 24-48 jam), yang menandakan bahwa adhesi konidia dan proses germinasi awal sudah berlangsung cepat setelah paparan. *Discoloration* pada 0-24 jam (P1 dan P2), mengindikasikan bahwa formulasi dengan lama simpan pendek memiliki proporsi konidia hidup yang cukup tinggi untuk memulai infeksi lebih cepat dibanding perlakuan dengan simpan lebih panjang (P3-P6).

Tahap pelunakan tubuh (ISSI ≥ 3) umumnya muncul kemudian, pada 24-72 jam tergantung perlakuan. Pada P1 onset pelunakan tercatat lebih awal (24-48 jam), sedangkan pada P3 onset pelunakan baru jelas pada 48-72 jam. Perbedaan ini mencerminkan perbedaan laju penetrasi dan perkembangan intraseluler: formulasi yang lebih “segar” cenderung menghasilkan penetrasi kutikula dan kolonisasi hemocoel yang lebih cepat, sehingga gejala pelunakan muncul lebih dini.

Tahap melanisasi (ISSI ≥ 4) dan mumifikasi awal (ISSI ≥ 5) menandai transisi menuju infeksi sistemik yang lebih parah. Pada P1 dan P2, kedua tahap ini tercapai lebih cepat (48-96 jam), sementara pada P3 keempat tahap tersebut terdistribusi lebih lambat dan tertunda hingga 96-120 jam untuk mumifikasi awal. Untuk perlakuan P4-P6 banyak tahap lanjut (melanisasi/mumifikasi) tidak tercapai atau tercapai sangat terlambat, yang menunjukkan penurunan kemampuan patogenik formulasi seiring lama penyimpanan.

Pola onset yang diamati konsisten dengan mekanisme infeksi *M. anisopliae* adhesi dan germinasi konidia diikuti penetrasi oleh enzim hidrolitik, lalu proliferasi dalam hemocoel yang menghasilkan metabolit toksik penyebab melanisasi dan kematian (Shang et al., 2024; Karthi et al., 2024). Percepatan onset pada P1-P2 mengindikasikan viabilitas konidia yang lebih tinggi dan kapasitas sporulasi internal yang lebih cepat, sedangkan keterlambatan pada P3-P6 mengisyaratkan degradasi fisiologis konidia selama penyimpanan.

Informasi onset per tahap ini sangat berguna untuk penentuan waktu aplikasi di lapang. Formulasi yang masih “segara” (P1-P2) menunjukkan potensi untuk menghasilkan infeksi sistemik dalam waktu kurang dari lima hari, sedangkan formulasi yang disimpan lebih lama memerlukan waktu lebih lama atau mungkin tidak mencapai tingkat infeksi yang signifikan. Lama simpan formulasi kering *M. anisopliae* untuk mempertahankan kemampuan memicu onset gejala kritis yang berkaitan dengan mortalitas efektif adalah 1-2 bulan. Pendekatan ambang ISSI menjadi alat kuantitatif yang sensitif untuk membandingkan performa formulasi berdasarkan waktu munculnya gejala, dan dapat menjadi pelengkap penting bagi ukuran mortalitas tradisional. Mortalitas tinggi pada P1-P2 selaras dengan Δ ISSI yang cepat dan onset melanisasi/mumifikasi yang lebih awal, sedangkan keterlambatan onset dan rendahnya Δ ISSI pada P4-P6 konsisten dengan penurunan mortalitas kumulatif. Hal ini menegaskan bahwa dua parameter kuantitatif baru (Δ ISSI dan onset) mampu menjelaskan variasi patogenesis antar perlakuan secara lebih detail dibanding mortalitas saja. Untuk penelitian lebih lanjut, disarankan melengkapi analisis onset ini dengan pengukuran viabilitas konidia (persentase kecerahan germinasi) dan evaluasi visual terperinci (foto berulang) untuk memverifikasi keterkaitan antara nilai ISSI numerik dan manifestasi morfologis nyata.

4 Kesimpulan

Efektivitas formulasi kering *M. anisopliae* terhadap imago *C. formicarius* sangat dipengaruhi oleh lama penyimpanan. Formulasi dengan lama simpan singkat (P1-P2) menghasilkan perkembangan gejala yang lebih cepat, ditandai oleh nilai Δ ISSI tinggi dan onset melanisasi, mumifikasi yang lebih awal, sehingga menghasilkan mortalitas kumulatif yang lebih besar dalam 120 jam. Sebaliknya, formulasi dengan penyimpanan lebih lama (P4-P6) menunjukkan laju progresi gejala yang melambat, onset gejala lanjut yang tertunda atau tidak tercapai, serta mortalitas yang rendah, mengindikasikan penurunan viabilitas konidia selama penyimpanan. Dua parameter kuantitatif baru (Δ ISSI dan onset berbasis ambang ISSI) mampu memberikan gambaran lebih sensitif mengenai dinamika infeksi awal dibandingkan data mortalitas saja. Masa simpan formulasi dalam rentang 1-2 bulan agar infektivitas tetap optimal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktur Politeknik Pertanian Negeri Kupang atas dukungan dan pendanaan yang telah diberikan untuk pelaksanaan penelitian ini melalui skema PNBPN Tahun Anggaran 2024.

Daftar Pustaka

- Bayu, M. S. Y. I., & Prayogo, Y. (2016). Pengendalian hama penggerek ubi jalar *Cylas formicarius* (Fabricus) (Coleoptera: Curculionidae) menggunakan cendawan entomopatogen *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin. *Jurnal Entomologi Indonesia*, 13(1), 40–48. <https://doi.org/10.5994/jei.13.1.40>
- Das, P., Hazarika, L. K., Bora, Puzari, K. C., & Kalita, S. (2013). Influence of Storage Conditions on Viability and Infectivity of talc based WP Formulation of *Beauveria bassiana* Against Rice Hispa, *Dicladispa armigera* (Olivier). *Journal of Biological Control*, 27(3), 229–233. <https://doi.org/10.18311/jbc/2013/3284>
- Garcia Riaño, J. L., Quiroga-Cubides, G., Espinel, C., Gómez Valderrama, J. A., Gómez Álvarez, M. I., & Cortés-Rojas, D. F. (2022). Shelf-life study of oil-based formulations of *Beauveria bassiana* enriched with osmoprotectants: Effect on conidia germination and efficacy on *Diatraea saccharalis*. *Biocontrol Science and Technology*, 32(11), 1285–1301. <https://doi.org/10.1080/09583157.2022.2109126>
- Immediato, D., Iatta, R., Camarda, A., Giangaspero, A., Capelli, G., Figueredo, L. A., Otranto, D., & Cafarchia, C. (2017). Storage of *Beauveria bassiana* Conidia Suspension: A Study Exploring the Potential Effects on Conidial iability and Virulence against *Dermanyssus gallinae* De Geer, 1778 Acari: Dermanyssidae. *Annals of Biological Sciences*, 05(02). <https://doi.org/10.21767/2348-1927.1000111>
- Ingle, Y. V. (2016). Shelf-life and infectivity study of carrier formulations of entomogenous fungus *Nomuraea rileyi* (Farlow) Samson. *ASIAN JOURNAL OF BIO SCIENCE*, 11(2), 273–276. <https://doi.org/10.15740/HAS/AJBS/11.2/273-276>
- Irawan, N., Purnomo, P., Indriyati, I., & Wibowo, L. (2015). Pengujian Formulasi Kering *Metarhizium anisopliae* Isolat Ugm Dan Tegineneng Serta *Beauveria bassiana* Isolat Tegineneng Untuk Mematikan *Helopeltis* spp. Di Laboratorium Dan Di Lapangan. *Jurnal Agrotek Tropika*, 3(1). <https://doi.org/10.23960/jat.v3i1.1977>
- Karthi, S., Vasantha-Srinivasan, P., Senthil-Nathan, S., Han, Y. S., Shivakumar, M. S., Murali-Baskaran, R. K., Kalaivani, K., Radhakrishnan, N., Park, K. B., & Malafaia, G. (2024). Entomopathogenic fungi promising biocontrol agents for managing lepidopteran pests: Review of current knowledge. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 58, 103146. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103146>
- Lapinangga, N. J., & da Lopez, Y. F. (2016). Efektivitas Cendawan Entomopatogen Isolat Lokal Terhadap Hama Kumbang Ubi Jalar *Cylas formicarius fabricus*. *PARTNER*, 21(2), 317. <https://doi.org/10.35726/jp.v21i2.219>
- Lapinangga, N. J., & da Lopez, Y. F. (2018). Pemanfaatan Bahan Nabati Lokal Berefek Pesticida untuk Mengendalikan Hama *Cylas formicarius* pada Tanaman Ubi Jalar. *Agrovigor: Jurnal Agroekoteknologi*, 34–38. <https://doi.org/10.21107/agrovigor.v11i1.3822>
- Lapinangga, N. J., Sonbai, J. H. H., & Bunga, J. A. (2022a). Adding Several Types of Insect Flour to Increase the Virulence of *Metarhizium anisopliae* Local Isolates against Pests *Cylas formicarius*. *Ecology, Environment and Conservation*, S38–S42. <https://doi.org/10.53550/EEC.2022.v28i05s.007>
- Lapinangga, N. J., Sonbai, J. H. H., & Bunga, J. A. (2022b). Pengaruh Jenis Formulasi Terhadap Kualitas Jamur Entomopatogen *Metarhizium Anisopliae*. *Prosiding Seminar Nasional Hasil-Hasil Penelitian*, 5. <https://ejurnal.politanikoe.ac.id/index.php/psnp/article/view/123>
- Lei, C. J., Ahmad, R. H. I. R., Halim, N. A., Asib, N., Zakaria, A., & Azmi, W. A. (2023). Bioefficacy of an Oil-Emulsion Formulation of Entomopathogenic Fungus,

- Metarhizium anisopliae against Adult Red Palm Weevil, Rhynchophorus ferrugineus. *Insects*, 14(5), 482. <https://doi.org/10.3390/insects14050482>
- Litwin, A., Nowak, M., & Różalska, S. (2020). Entomopathogenic fungi: Unconventional applications. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 23–42. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09525-1>
- Manikome, N. (2021). Pengendalian Hama Cylas Formicarius pada Tanaman Ubi Jalar (Ipomea Batatas L.) Menggunakan Cendawan Entomopatogen Metarhizium SP. *JUSTE (Journal of Science and Technology)*, 1(2), 142–152.
- Mannino, M. C., Davyt-Colo, B., & Pedrini, N. (2021). Toxic Secondary Metabolites and Virulence Factors Expression by Entomopathogenic Fungi during Insect Infection and Potential Impact as a Tool for Pest Management. Dalam Md. A. Khan & W. Ahmad (Ed.), *Microbes for Sustainable Insect Pest Management* (Vol. 17, hlm. 121–134). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67231-7_6
- Mantzoukas, S., Lagogiannis, I., Kitsiou, F., & Eliopoulos, P. A. (2023). Entomopathogenic Action of Wild Fungal Strains against Stored Product Beetle Pests. *Insects*, 14(1), 91. <https://doi.org/10.3390/insects14010091>
- Nuraida, & Lubis, A. (2016). Pengaruh Formulasi Dan Lama Penyimpanan Pada Viabilitas, Bioaktivitas Dan Persistensi Cendawan Metarhizium anisopliae Terhadap Crocidolomia pavonana Fabricius. *JURNAL HAMA DAN PENYAKIT TUMBUHAN TROPIKA*, 16(2), 196. <https://doi.org/10.23960/j.hptt.216196-202>
- Ould Etheimine, M., Kane, C. M. H., Ould Ely, S., Barry, A., Mohamed, S. O., Babah, M. A. O., & Benchekroun, M. (2013). Storability of five new formulations of Green Muscle® (Metarhizium acridum) under ambient and low temperatures: Evaluation of conidial viability and virulence against desert locust nymphs. *International Journal of Tropical Insect Science*, 33(03), 195–201. <https://doi.org/10.1017/S1742758413000131>
- Prisilya, E., Afifah, L., Sugiarto, S., & Kurniati, A. (2023). Uji Efektivitas Aplikasi Cendawan Entomopatogen Metarhizium anisopliae Terhadap Mortalitas Wereng Batang Coklat (Nilaparvata lugens Stal.). *JURNAL AGROPLASMA*, 10(2), 776–784. <https://doi.org/10.36987/agroplasma.v10i2.4503>
- Quesada-Moraga, E., González-Mas, N., Yousef-Yousef, M., Garrido-Jurado, I., & Fernández-Bravo, M. (2024). Key role of environmental competence in successful use of entomopathogenic fungi in microbial pest control. *Journal of Pest Science*, 97(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10340-023-01622-8>
- Shang, J., Hong, S., & Wang, C. (2024). Fights on the surface prior to fungal invasion of insects. *PLOS Pathogens*, 20(2), e1011994. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1011994>
- Sonbai, J. H. H., & Lapinangga, N. J. (2023). Efektivitas Beberapa Media Perbanyakkan Terhadap Perkembangan Jamur Entomopatogen Metarrhizium anisopliae Isolat Lokal. *Prosiding Seminar Nasional Hasil-Hasil Penelitian*, 6. <https://ejurnal.politanikoe.ac.id/index.php/psnp/article/view/292>
- Syazwan, S. A., Lee, S. Y., Sajap, A. S., Lau, W. H., Omar, D., & Mohamed, R. (2021). Interaction between Metarhizium anisopliae and Its Host, the Subterranean Termite Coptotermes curvignathus during the Infection Process. *Biology*, 10(4), 263. <https://doi.org/10.3390/biology10040263>
- Zulfiana, D., Zulfritri, A., Lestari, A. S., Krishanti, N. P. R. A., & Meisyara, D. (2020). Production of Conidia by Entomopathogenic Fungi and Their Pathogenicity Against Coptotermes sp. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v12i1.22435>