



CENDAWAN ENDOFIT DAUN ASAL ZINGIBERACEAE POTENSIAL UNTUK MENEKAN *Proxipyricalaria zingiberis* PENYEBAB PENYAKIT BERCAK DAUN PADA TANAMAN JAHE

MARLINA PUSPITA SARI



PROGRAM STUDI FITOPATOLOGI
FAKULTAS PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Cendawan Endofit Daun asal Zingiberaceae Potensial untuk Menekan *Proxipyricalaria zingiberis* Penyebab Penyakit Bercak Daun pada Tanaman Jahe” adalah karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari hasil penelitian saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Marlina Puspita Sari
A3602231002







RINGKASAN

MARLINA PUSPITA SARI. Cendawan Endofit Daun asal Zingiberaceae Potensial untuk Menekan *Proxipyricalaria zingiberis* Penyebab Penyakit Bercak Daun pada Tanaman Jahe. Dibimbing oleh SURYO WIYONO, GIYANTO, AWANG MAHARIJAYA, DONO WAHYUNO

Penyakit bercak daun yang disebabkan oleh *Proxipyricalaria zingiberis* merupakan salah satu kendala pada budidaya jahe karena dapat menurunkan produktivitas tanaman sebesar 13%–66%. Penelitian ini mengeksplorasi cendawan endofit daun asal Zingiberaceae, mengkaji potensinya sebagai agen pengendali hayati penyakit bercak daun pada jahe, serta pengaruh kolonisasi cendawan endofit terhadap perubahan metabolit tanaman. Penelitian disusun dalam tiga studi utama yang mencakup aspek ekologi komunitas cendawan endofit, potensi biokontrol, dan respons metabolom tanaman.

Studi pertama berfokus pada eksplorasi dan karakterisasi komunitas cendawan endofit daun dari sembilan spesies Zingiberaceae. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kolonisasi, struktur komunitas, dan pola keanekaragaman cendawan endofit pada berbagai inang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kolonisasi dipengaruhi oleh kekerabatan taksonomi tanaman inang, namun pola keanekaragaman spesies cendawan endofit tidak sepenuhnya mencerminkan kekerabatan taksonomi tanaman inang. Komunitas cendawan endofit didominasi oleh genus *Colletotrichum*, diikuti oleh *Phyllosticta* dan *Diaporthe*. Hasil ini menunjukkan bahwa Zingiberaceae merupakan sumber keanekaragaman cendawan endofit yang berpotensi dimanfaatkan dalam pengendalian hayati.

Studi kedua mengevaluasi kemampuan cendawan endofit daun dalam menekan pertumbuhan *P. zingiberis*. Sebanyak 27 isolat menunjukkan kategori aman hayati berdasarkan uji hemolisis dan fitopatogenisitas. Pada pengujian *in vitro*, isolat terpilih mampu menghambat pertumbuhan patogen melalui mekanisme kompetisi dan antibiosis. Beberapa isolat juga terdeteksi menghasilkan IAA dan enzim hidrolitik pada medium buatan yang mengindikasikan potensi tambahan dalam memacu pertumbuhan tanaman dan mendegradasi dinding sel patogen. Pengujian *in planta* menunjukkan bahwa aplikasi cendawan endofit terpilih secara signifikan menurunkan keparahan penyakit bercak daun. Isolat *Colletotrichum gigasporum* (E2) merupakan isolat yang paling efektif dalam menekan penyakit bercak daun serta menghasilkan bobot basah rimpang tertinggi.

Studi ketiga mengkaji pengaruh kolonisasi cendawan endofit dan inokulasi *P. zingiberis* terhadap perubahan profil metabolit daun jahe. Delapan isolat cendawan endofit berhasil mengkolonisasi daun jahe pada 5 hari setelah inokulasi (HSI). Analisis metabolomik dilakukan menggunakan pendekatan *untargeted* berbasis LC-MS/HRMS pada dua titik waktu pengambilan sampel, yaitu 5 HSI setelah aplikasi endofit dan 5 HSI setelah inokulasi patogen. Sebanyak 41 senyawa berhasil dianalisis secara putatif. Analisis multivariat dengan *Principal Component Analysis* (PCA) dan *Partial Least Squares Discriminant Analysis* (PLS-DA) menunjukkan bahwa inokulasi cendawan endofit maupun infeksi patogen *P. zingiberis* memengaruhi profil metabolit daun dengan pola respons yang spesifik pada masing-masing isolat. Perubahan metabolik tersebut ditandai oleh akumulasi



beberapa metabolit yang diduga terkait dengan respons pertahanan tanaman, terutama asam pipecolat dan asam jasmonat. Kedua senyawa tersebut menunjukkan korelasi negatif yang kuat dengan nilai AUDPC serta korelasi positif dengan bobot rimpang, mengindikasikan bahwa peningkatan metabolit pertahanan pada tanaman yang diinokulasi endofit mungkin berkaitan dengan penurunan keparahan penyakit sekaligus perbaikan kondisi fisiologis tanaman yang mendukung pertumbuhan rimpang. Meskipun demikian, hubungan ini bersifat korelatif, sehingga konfirmasi melalui pendekatan *targeted metabolomics* dan analisis fungsional masih diperlukan untuk memastikan hubungan kausal antara perubahan metabolit dan penekanan penyakit bercak daun. Terlepas dari keterbatasan tersebut, penelitian ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa cendawan endofit daun asal Zingiberaceae memiliki potensi sebagai agens pengendali hayati yang efektif terhadap penyakit bercak daun pada jahe.

Kata kunci: AUDPC, bobot rimpang, pengendalian hayati, produktivitas jahe, profil metabolit

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



SUMMARY

MARLINA PUSPITA SARI. Leaf Endophytic Fungi from Zingiberaceae as Potential Agents for Suppressing *Proxipyricularia zingiberis*, the Causal Agent of Leaf Spot Disease in Ginger. Supervised by SURYO WIYONO, GIYANTO, AWANG MAHARIJAYA, DONO WAHYUNO.

Leaf spot disease caused by *Proxipyricularia zingiberis* is one of the major constraints in ginger cultivation, reducing crop productivity by 13%–66%. This study explored foliar endophytic fungi associated with Zingiberaceae, evaluated their potential as biological control agents against ginger leaf spot disease, and investigated the effects of endophytic fungal colonization on changes in plant metabolite profiles. The research comprised three major studies addressing the ecology of endophytic fungal communities, their biocontrol potential, and the metabolomic responses of ginger plants.

The first study focused on the exploration and characterization of foliar endophytic fungal communities from nine Zingiberaceae species. Analyses were conducted to evaluate colonization rates, community structure, and diversity patterns of endophytic fungi across different host plants. The results showed that colonization rates were influenced by the taxonomic relatedness of the host plants, whereas the diversity patterns of endophytic fungal species did not fully reflect host taxonomic relationships. The endophytic fungal community was dominated by the genus *Colletotrichum*, followed by *Phyllosticta* and *Diaporthe*. These findings demonstrate that Zingiberaceae represent a valuable reservoir of endophytic fungal diversity with considerable potential for biological control applications.

The second study evaluated the ability of foliar endophytic fungi to suppress the growth of *P. zingiberis*. Twenty-seven isolates were classified as biologically safe based on hemolysis and phytopathogenicity assays. Under *in vitro* conditions, selected isolates inhibited pathogen growth through competition and antibiosis. Several isolates also produced indole-3-acetic acid (IAA) and hydrolytic enzymes in artificial medium, indicating additional potential to promote plant growth and degrade pathogen cell walls. *In planta* experiments demonstrated that application of selected endophytic fungi significantly reduced the severity of leaf spot disease. *Colletotrichum gigasporum* (E2) was the most effective isolate, providing the greatest suppression of leaf spot disease while producing the highest fresh rhizome weight.

The third study investigated the effects of endophytic fungal colonization and *P. zingiberis* inoculation on changes in the metabolite profiles of ginger leaves. Eight endophytic fungal isolates successfully colonized ginger leaves within 5 days after inoculation (DAI). Untargeted metabolomic analysis was performed using LC–MS/HRMS at two sampling points: 5 DAI following endophyte application and 5 DAI following pathogen inoculation. A total of 41 compounds were putatively annotated. Multivariate analyses using Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) revealed that both endophytic fungal inoculation and *P. zingiberis* infection altered leaf metabolite profiles, with isolate-specific response patterns. These metabolic changes were characterized by the accumulation of several metabolites associated with plant defense responses, particularly pipelicolic acid and jasmonic acid. Both compounds



showed strong negative correlations with the area under the disease progress curve (AUDPC) and positive correlations with rhizome weight, suggesting that enhanced accumulation of defense-related metabolites in endophyte-inoculated plants may be associated with reduced disease severity and improved physiological conditions that support rhizome development. However, these relationships remain correlative, and confirmation through targeted metabolomics and functional analyses is still required to establish causal links between metabolite changes and suppression of leaf spot disease. Despite these limitations, the findings of this study collectively demonstrate that foliar endophytic fungi associated with Zingiberaceae possess considerable potential as effective biological control agents against leaf spot disease in ginger.

Keywords: AUDPC, biological control, ginger productivity, metabolite profile

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.





CENDAWAN ENDOFIT DAUN ASAL ZINGIBERACEAE POTENSIAL UNTUK MENEKAN *Proxipyricularia zingiberis* PENYEBAB PENYAKIT BERCAK DAUN PADA TANAMAN JAHE

@Hak cipta milik IPB University

MARLINA PUSPITA SARI

Disertasi

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor
pada Program Studi Fitopatologi

**PROGRAM STUDI FITOPATOLOGI
FAKULTAS PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

1. Dr. Hagia Sophia Khairani, S.P., M.Si.
2. Dr. Ir. Maya Melati, M.S., M.Sc.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

1. Dr. Hagia Sophia Khairani, S.P., M.Si.
2. Puji Lestari, S.P., M.Si., Ph



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

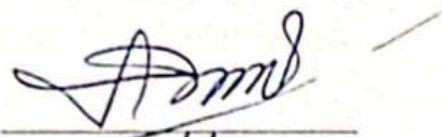
Judul disertasi : Cendawan Endofit Daun asal Zingiberaceae Potensial untuk Menekan *Proxipyricalaria zingiberis* Penyebab Penyakit Bercak Daun pada Tanaman Jahe

Nama : Marlina Puspita Sari

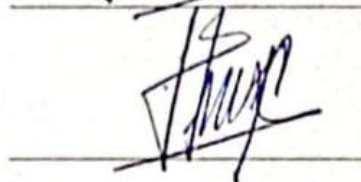
NIM : A3602231002

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Suryo Wiyono, M.Sc.Agr.



Pembimbing 2:
Dr. Ir. Giyanto, M.Si.



Pembimbing 3:
Prof. Dr. Awang Maharijaya, S.P., M.Si.



Pembimbing 4:
Dr. Ir. Dono Wahyuno

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Abdjad Asih Nawangsih, M.Si.
NIP. 196506211989102001



Dekan Fakultas Pertanian:
Prof. Dr. Ir. Suryo Wiyono, M.Sc. Agr.
NIP. 196902121992031003



Tanggal Ujian Tertutup : 2 Juli 2026

Tanggal Lulus: 04 AUG 2026



PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, karunia, dan penyertaan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul “*Cendawan Endofit Daun asal Zingiberaceae Potensial untuk Menekan Proxipyricalaria zingiberis Penyebab Penyakit Bercak Daun pada Tanaman Jahe*” dengan baik. Disertasi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Fitopatologi, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor. Penelitian dan penulisan disertasi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, arahan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Suryo Wiyono, M.Sc.Agr. selaku ketua komisi pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, motivasi, dan masukan yang sangat berharga selama proses penelitian dan penyusunan disertasi ini.
2. Dr. Ir. Giyanto, Prof. Dr. Awang Maharijaya, M.Sc., dan Dr. Ir. Dono Wahyuno selaku anggota komisi pembimbing atas saran, motivasi, perhatian, dan dukungan selama pelaksanaan penelitian hingga penyelesaian naskah disertasi.
3. Moderator seminar dan para penguji luar komisi pembimbing atas kritik, masukan, dan saran yang konstruktif.
4. Seluruh dosen dan staf Program Studi Fitopatologi, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor atas ilmu, bantuan, dan pengalaman yang telah diberikan selama masa studi.
5. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), Kementerian Keuangan Republik Indonesia, atas kesempatan dan dukungan pendanaan melalui skema Beasiswa *Targeted* ASN/TNI/POLRI Tahun 2023 yang memungkinkan penulis untuk melanjutkan dan menyelesaikan studi doctoral ini.
6. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) serta seluruh rekan kerja dan peneliti yang telah memberikan dukungan fasilitas, bantuan teknis, dan semangat selama penelitian berlangsung.
7. Fakultas Pertanian IPB dan seluruh pihak yang telah membantu penyediaan fasilitas penelitian, laboratorium, serta rumah kaca untuk mendukung pelaksanaan penelitian.
8. Bapak dan Ibu peneliti senior serta rekan sejawat di Laboratorium “Hamid” yang telah banyak memberikan saran, masukan, menjadi rekan diskusi, serta membantu penyediaan bahan maupun alat yang digunakan dalam penelitian ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa Pascasarjana yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kebersamaan selama menempuh studi doctoral.
10. Bapak Sumarjana dan Ibu Winarni, kedua orang tua tercinta, atas doa yang tidak pernah putus, dukungan, kasih sayang, dan semangat yang rasanya tidak akan pernah cukup dibalas hanya dengan ucapan terima kasih.
11. Suami tercinta Dhian Argo Wibowo, yang telah menemani perjalanan akademik penulis sejak masa sarjana, magister, hingga doktor. Terima kasih

atas izin, doa, kesabaran, dukungan, serta waktu yang harus banyak direlakan selama penulis menempuh pendidikan doktoral.

12. Untuk putri tercinta Embun Rinjani Wibowo dan putra tersayang Bhumi Semeru Wibowo, terima kasih atas cinta, pengertian, dan semangat yang selalu menjadi sumber kekuatan bagi penulis. Semoga perjalanan ini dapat menjadi teladan bahwa belajar, berjuang, dan berani bermimpi merupakan bagian penting dalam meraih cita-cita.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih memiliki berbagai keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ini pada masa mendatang. Penulis berharap disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang fitopatologi, mikrobiologi, serta pemanfaatan cendawan endofit dalam pengelolaan penyakit tanaman.

Bogor, Juli 2026

Marlina Puspita Sari



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	ix
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	4
1.7 Hipotesis	5
II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Syarat Hidup dan Budidaya Tanaman Jahe	6
2.2 Penyakit Bercak Daun Jahe	6
2.3 Pengendalian Penyakit Bercak Daun Jahe	8
2.4 Karakteristik Cendawan Endofit	9
2.5 Mekanisme Cendawan Endofit sebagai Agens Pengendali Hayati	10
2.6 Sistem Ketahanan pada Tanaman	12
2.7 Metabolit Tanaman dan Pendekatan Metabolomik dalam Studi Interaksi Tanaman–Mikroba	14
III KEANEKARAGAMAN CENDAWAN ENDOFIT DAUN DARI BERBAGAI TANAMAN FAMILI ZINGIBERACEAE	16
3.1 Abstrak	16
3.2 Pendahuluan	16
3.3 Waktu dan Lokasi Penelitian	17
3.4 Bahan dan Metode Penelitian	18
3.5 Hasil dan Pembahasan	20
3.6 Simpulan	32
IV CENDAWAN ENDOFIT POTENSIAL ASAL ZINGIBERACEAE UNTUK PENGENDALIAN BERCAK DAUN <i>Proxiyricularia zingiberis</i> PADA JAHE	34
4.1 Abstrak	34
4.2 Pendahuluan	34
4.3 Waktu dan Lokasi Penelitian	35
4.4 Bahan dan Metode Penelitian	35
4.5 Hasil dan Pembahasan	41
4.6 Simpulan	57
V DETEKSI KOLONISASI CENDAWAN ENDOFIT DAN PROFILING METABOLIT DAUN JAHE	58
5.1 Abstrak	58
5.2 Pendahuluan	58
5.3 Waktu dan Lokasi Penelitian	60



5.4	Bahan dan Metode Penelitian	60
5.5	Hasil dan Pembahasan	62
5.6	Simpulan	72

VI	PEMBAHASAN UMUM	74
----	-----------------	----

VII	SIMPULAN DAN SARAN UMUM	78
-----	-------------------------	----

7.1	Simpulan Umum	78
-----	---------------	----

7.2	Saran Umum	78
-----	------------	----

	DAFTAR PUSTAKA	79
--	----------------	----

	LAMPIRAN	93
--	----------	----

	RIWAYAT HIDUP	100
--	---------------	-----



DAFTAR TABEL

3.1	Tanaman yang digunakan dalam penelitian ini	21
3.2	Matriks jarak taksonomi antar tanaman inang famili Zingiberaceae berdasarkan klasifikasi taksonomi	22
3.3	Indeks keanekaragaman cendawan endofit pada berbagai tanaman dalam famili Zingiberaceae	23
4.1	Kandidat isolat cendawan endofit sebagai agen biokontrol terbaik berdasarkan hasil uji <i>in vitro</i>	47
4.2	Kesesuaian terbaik hasil BLAST pada NCBI GenBank untuk cendawan endofit daun berdasarkan sekuen parsial ITS, TEF1- α , ACT, dan TUB	50
4.3	Pengaruh aplikasi cendawan endofit terpilih terhadap pertumbuhan tanaman	54
5.1	Metabolit penting yang terkait dengan pertahanan tanaman dan produktivitas pada daun jahe sebelum dan setelah inokulasi patogen (VIP > 1,5 dan $ \log_2FC \geq 1$)	69

DAFTAR GAMBAR

1.1	Kerangka penelitian	4
2.1	Gejala bercak <i>Proxipyricularia zingiberis</i> pada nodul rimpang (Kotani dan Kurata 1992)	7
2.2	Gejala penyakit bercak daun <i>Proxipyricularia zingiberis</i> pada jahe a)gejala banyak muncul pada daun yang sudah membuka sempurna b)gejala khas berbentuk berlian dikelilingi halo berwarna kuning (dokumentasi pribadi)	8
2.3	Mekanisme cendawan endofit dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cendawan patogen (Akram <i>et al.</i> 2023)	10
3.1	Performa tanaman inang Zingiberaceae yang digunakan dalam penelitian ini. (A) <i>Alpinia malaccensis</i> : (1) habitus tanaman, (2) buah, (3) daun; (B) <i>A. galanga</i> : (1) habitus tanaman, (2) daun; (C) <i>Etlingera elatior</i> : (1) habitus tanaman, (2) daun, (3) bunga dan tunas; (D) <i>Zingiber zerumbet</i> ; (E) <i>Z. officinale</i> var. <i>officinale</i> ; (F) <i>Z. officinale</i> var. <i>amarum</i> ; (G) <i>Z. officinale</i> var. <i>rubrum</i> ; (H) <i>Curcuma longa</i> ; (I) <i>C. xanthorrhiza</i> .	21
3.2	Tingkat kolonisasi cendawan endofit pada berbagai spesies tanaman inang. Titik berwarna menunjukkan ulangan individu, sedangkan titik hitam menunjukkan nilai rata-rata $\pm$ standar deviasi. Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata antar inang berdasarkan uji ANOVA satu arah yang dilanjutkan dengan uji Tukey HSD ($P < 0,001$)	22
3.3	Heatmap korelasi antara genus cendawan endofit dengan tanaman inangnya. Intensitas warna mewakili frekuensi isolasi (%) dari setiap genus endofit. Pengelompokan baris dan kolom (jarak Euclidean) berdasarkan kemiripan dalam kelimpahan di seluruh inang.	24
3.4	Variasi morfologi koloni isolat <i>Colletotrichum</i> endofit asal Zingiberaceae pada 7 HSI di medium PDA 20%	25

- 3.5 Pohon filogenetik dari isolat *Colletotrichum* berdasarkan sekuens ITS dengan metode *neighbour-joining* (1.000 ulangan *bootstrap*). *Phyllosticta capitalensis* sebagai outgroup. Nilai *bootstrap* >70% ditampilkan pada cabang pohon. 26
- 3.6 Heatmap spesies *Colletotrichum* pada berbagai inang Zingiberaceae. Intensitas warna menunjukkan frekuensi isolasi cendawan endofit; baris dan kolom dikelompokkan berdasarkan jarak Euclidean. 27
- 3.7 Variasi morfologi koloni isolat *Phyllosticta* endofit asal Zingiberaceae pada 7 HSI di medium PDA 20% 28
- 3.8 Pohon filogenetik dari isolat *Phyllosticta* berdasarkan sekuens ITS dengan metode *neighbour-joining* (1.000 ulangan *bootstrap*). *Neofusicoccum mediterraneum* dan *Diplodia seriata* sebagai outgroup. Nilai *bootstrap* >70% ditampilkan pada cabang pohon. 29
- 3.9 Heatmap spesies *Phyllosticta* pada berbagai inang Zingiberaceae. Intensitas warna menunjukkan frekuensi isolasi cendawan endofit; baris dan kolom dikelompokkan berdasarkan jarak Euclidean. 30
- 3.10 Variasi morfologi koloni isolat *Diaporthe* endofit asal Zingiberaceae pada 7 HSI di medium PDA 20% 31
- 3.11 Pohon filogenetik *neighbour-joining* dari isolat *Diaporthe* berdasarkan sekuens ITS (1.000 ulangan *bootstrap*), dengan *Neofusicoccum mediterraneum* sebagai outgroup; nilai *bootstrap* >70% ditampilkan 31
- 3.12 Heatmap spesies *Diaporthe* pada berbagai inang Zingiberaceae. Intensitas warna menunjukkan frekuensi isolasi cendawan. Baris dan kolom dikelompokkan berdasarkan jarak Euclidean 32
- 4.1 Distribusi isolat cendawan endofit berdasarkan uji hemolisis dan fitopatogenisitas: (A) persentase; (B) distribusi per tanaman inang. 41
- 4.2 Hasil uji aktivitas hemolisis dan fitopatogenisitas isolat cendawan endofit. (A) Reaksi hemolisis pada medium agar darah yang ditunjukkan oleh zona bening di sekitar koloni (anak panah); (B) uji fitopatogenisitas pada kecambah dengan respons negatif (–) dan positif (+); (C) gejala pada daun akibat inokulasi isolat cendawan endofit yang menunjukkan respons negatif (–) dan positif (+). 42
- 4.3 Tipe interaksi antara cendawan endofit dan patogen pada uji kultur ganda dan persentase distribusi masing-masing tipe interaksi 43
- 4.4 Persentase penghambatan pertumbuhan koloni *Proxipyricularia zingiberis* oleh cendawan endofit pada berbagai tipe interaksi 43
- 4.5 Kemampuan cendawan endofit asal Zingiberaceae dalam menghasilkan senyawa volatil. (A) Persentase penghambatan pertumbuhan koloni *P. zingiberis*; (B) visualisasi hasil uji senyawa volatil pada beberapa isolat cendawan endofit 44
- 4.6 Kemampuan cendawan endofit asal Zingiberaceae dalam menghasilkan enzim kitinase dan glukukanase. (A) Indeks aktivitas kitinolitik dan glukukanolitik pada seluruh isolat yang diuji; (B) visualisasi aktivitas kitinase yang ditunjukkan oleh pembentukan zona bening di sekitar koloni pada medium uji; (C) visualisasi aktivitas glukukanase yang ditunjukkan oleh pembentukan zona bening pada medium spesifik. 45
- 4.7 Produksi asam indol-3-asetat (IAA) oleh cendawan endofit. (A) Konsentrasi IAA pada berbagai isolat; (B) larutan standar IAA; (C)

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

- perubahan warna eksudat cendawan setelah penambahan reagen sebagai indikator sintesis IAA. 46
- 4.8 Morfologi koloni dan karakteristik konidia cendawan endofit terpilih. (A, C, E, G, I, K, M, dan O) morfologi koloni masing-masing isolat 7 hari setelah inkubasi (HSI) pada medium PDA ; (B, D, F, H, J, L, N, dan P) konidia yang dihasilkan oleh isolat yang bersesuaian (ditampilkan di sebelah kiri). Skala = 10 μ m. 49
- 4.9 Pohon filogenetik *Colletotrichum* berbasis dua lokus. Pohon dikonstruksi dengan metode *neighbour-joining* menggunakan 1.000 ulangan *bootstrap*. Nilai *bootstrap* ditampilkan pada simpul dendrogram, sedangkan nilai <70% tidak ditampilkan. 51
- 4.10 Pohon filogenetik *Phyllosticta* berbasis dua lokus. Pohon dikonstruksi dengan metode *neighbour-joining* menggunakan 1.000 ulangan *bootstrap*. Nilai *bootstrap* ditampilkan pada simpul dendrogram, sedangkan nilai <70% tidak ditampilkan. 51
- 4.11 Pohon filogenetik *Fusarium* berbasis dua lokus. Pohon dikonstruksi dengan metode *neighbour-joining* menggunakan 1.000 ulangan *bootstrap*. Nilai *bootstrap* ditampilkan pada simpul dendrogram, sedangkan nilai <70% tidak ditampilkan. 52
- 4.12 Pohon filogenetik *Diaporthe* berbasis dua lokus. Pohon dikonstruksi dengan metode *neighbour-joining* menggunakan 1.000 ulangan *bootstrap*. Nilai *bootstrap* ditampilkan pada simpul dendrogram, sedangkan nilai <70% tidak ditampilkan. 52
- 4.13 Konfirmasi *Proxiopyricularia zingiberis* sebagai penyebab bercak daun (A) Morfologi koloni *P. zingiberis* Pyr-J2 pada medium PDA setelah 7 hari inkubasi; (B) konidia; (C) perkecambahan konidia (Cd) dan pembentukan apresorium (Ap); (D) gejala penyakit; serta (E) pohon filogenetik isolat yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan kombinasi sekuens gen ITS dan ACT. Pohon filogenetik dikonstruksi menggunakan metode *neighbour-joining* dengan 1.000 ulangan *bootstrap*. Skala batang = 10 μ m. 53
- 4.14 Performa pertumbuhan tanaman jahe dan rimpang pada berbagai perlakuan endofit. 55
- 4.15 Pengaruh aplikasi cendawan endofit terhadap (A) periode inkubasi, (B) AUDPC, dan (C) bobot rimpang. Nilai yang disajikan merupakan rata-rata dari tiga ulangan, dan batang galat menunjukkan simpangan baku (SD). Batang yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda nyata berdasarkan uji Tukey HSD ($p < 0,05$). K+ = kontrol yang diinokulasi patogen (*P. zingiberis*), K- = kontrol tanpa inokulasi; E1 = *C. plurivorum*, E2 = *C. gigasporum*, E3 = *P. capitalensis*, E4 = *P. capitalensis*, E5 = *C. karsti*, E6 = *F. keratoplasticum*, E7 = *P. paracapitalensis*, dan E8 = *D. ueckeri*. 56
- 5.1 Tingkat kolonisasi cendawan endofit pada 2, 5, dan 10 hari setelah inokulasi (hsi). Huruf yang sama pada setiap kolom menunjukkan tidak berbeda nyata pada tingkat kepercayaan 95% berdasarkan uji Tukey's HSD. Data ditransformasi menggunakan transformasi *arcsine square root* untuk memenuhi asumsi kenormalan. 62

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

5.2 Perkecambahan konidia dan pembedakan apresorium cendawan endofit yang diaplikasikan ke permukaan daun (2HSI). Skala batang = 50µm.	63
5.3 <i>Overlay</i> kromatogram <i>Base Peak Intensity</i> (BPI) dari profil metabolit tanaman berdasarkan analisis LC-MS/HRMS pada berbagai perlakuan aplikasi cendawan endofit. Variasi pola dan intensitas puncak mengindikasikan adanya perubahan komposisi dan kelimpahan relatif metabolit antar perlakuan.	64
5.4 Heatmap profil metabolit daun jahe pada berbagai perlakuan cendawan endofit sebelum (-) dan setelah (+) inokulasi <i>Proxipyricularia zingiberis</i> . Intensitas warna menunjukkan tingkat kelimpahan relatif metabolit, dengan warna merah menunjukkan akumulasi lebih tinggi dan warna biru menunjukkan akumulasi lebih rendah.	66
5.5 PCA dan PLS-DA profil metabolit pada daun jahe yang diberi perlakuan cendawan endofit daun sebelum dan setelah inokulasi patogen. (a–b) Plot skor PCA yang menunjukkan pengelompokan perlakuan secara tidak terawasi (<i>unsupervised</i>) sebelum dan setelah inokulasi <i>P. zingiberis</i> . (c–d) Plot skor PLS-DA yang menunjukkan pemisahan perlakuan secara terawasi (<i>supervised</i>).	67
5.6 Plot skor VIP yang diturunkan dari model PLS-DA (a) sebelum inokulasi patogen (b) setelah inokulasi patogen. Metabolit dengan nilai VIP > 1,5 dianggap berkontribusi signifikan terhadap pemisahan kelompok. 2,3 DHPS = 2,3-dihidroksipropil stearat; DHM-PrDHC = 2',6'-dihidroksi-4'-metoksi-3'; AMD-AdaOH = 3-amino-5,7-dimetiladamantan-1-ol; OPDA = 12-okso fitodienoat.	68
5.7 Heatmap korelasi Pearson yang menunjukkan hubungan antara metabolit terpilih (VIP > 1,5; log2FC > 1), AUDPC, dan hasil rimpang. Warna pada setiap sel merepresentasikan koefisien korelasi Pearson, sedangkan nilai numerik hanya ditampilkan untuk korelasi yang signifikan secara statistik (p < 0,05).	70
6.1 Prediksi mekanisme peningkatan ketahanan tanaman jahe terhadap penyakit bercak daun oleh cendawan endofit	76

DAFTAR LAMPIRAN

1 Kesesuaian spesies terdekat berdasarkan sekuens ITS rDNA dan frekuensi isolasi cendawan endofit daun yang diisolasi dari inang Zingiberaceae	94
2 Komposisi metabolit daun jahe pada berbagai perlakuan cendawan endofit sebelum dan setelah inokulasi patogen	97