

**PERBANDINGAN PROFIL METABOLIT SEKUNDER JAMUR *Xylaria* sp.
PENYEBAB PENYAKIT BUSUK AKAR DAN PANGKAL BATANG TEBU
WILD TYPE DAN TERADAPTASI FUNGISIDA FLUTRIAFOL
MENGUNAKAN GC-MS**

SKRIPSI

Oleh

**Sifa Permatasari
2214191019**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PERBANDINGAN PROFIL METABOLIT SEKUNDER JAMUR *Xylaria* sp. PENYEBAB PENYAKIT BUSUK AKAR DAN PANGKAL BATANG TEBU *WILD TYPE* DAN TERADAPTASI FUNGISIDA FLUTRIAFOL MENGUNAKAN GC-MS

Oleh

SIFA PERMATASARI

Penyakit busuk akar dan pangkal batang pada tebu yang disebabkan oleh *Xylaria* sp. merupakan penyakit utama dengan kerugian signifikan. Salah satu alternatif pengendalian penyakit ini adalah aplikasi fungisida dari golongan *Demethylation Inhibitors* (DMI) seperti flutriafol. Penggunaan fungisida secara terus-menerus berisiko menyebabkan resistensi pada jamur patogen. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan membandingkan profil metabolit *Xylaria* sp. *wild type* dan teradaptasi fungisida flutriafol menggunakan GC-MS. Penelitian dilakukan melalui tahapan isolasi jamur dari tanaman tebu sakit, pembuatan *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol melalui seleksi bertingkat dengan peningkatan konsentrasi flutriafol, uji sensitivitas untuk menentukan nilai EC_{50} , produksi metabolit sekunder, serta analisis profil metabolit menggunakan GC-MS yang dilanjutkan dengan perhitungan *fold change*. Hasil penelitian menunjukkan nilai EC_{50} isolat *Xylaria* sp. *wild type* sebesar 1,96 $\mu\text{g/mL}$ dan *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol sebesar 2,5 $\mu\text{g/mL}$, yang menandakan penurunan sensitivitas pada *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol. Analisis GC-MS berhasil mengidentifikasi 27 metabolit sekunder, dengan 16 metabolit sekunder yang sama pada kedua isolat. Beberapa metabolit sekunder meningkat pada *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol, sedangkan sebagian lainnya menurun atau hanya muncul pada salah satu isolat. Berdasarkan penelitian ini dapat diketahui bahwa adaptasi pada fungisida flutriafol berkaitan dengan perubahan profil metabolit sekunder sebagai bentuk penyesuaian metabolisme jamur terhadap tekanan fungisida.

Kata kunci: *Demethylation Inhibitors* (DMI), flutriafol, GC-MS, metabolit sekunder, resistensi fungisida, *Xylaria* sp.

ABSTRAK

COMPARISON OF SECONDARY METABOLITE PROFILES OF XYLARIA SP. CAUSING SUGARCANE ROOT ROT AND BASAL STEM ROT IN WILD TYPE AND FLUTRIAFOL-ADAPTED ISOLATES USING GC-MS

By

Sifa Permatasari

Root rot and basal stem rot disease in sugarcane caused by *Xylaria* sp. is a major disease with significant losses. One alternative for controlling this disease is the application of fungicides from the Demethylation Inhibitors (DMI) group such as flutriafol. Continuous use of fungicides carries the risk of causing resistance in pathogenic fungi. This study aims to identify and compare the metabolite profiles of *Xylaria* sp. wild type and flutriafol-adapted isolates using GC-MS. The research was conducted through several stages, including fungal isolation from diseased sugarcane plants, development of flutriafol-adapted *Xylaria* sp. through stepwise selection with increasing concentrations of flutriafol, sensitivity testing to determine EC_{50} values, production of secondary metabolites, and metabolite profiling analysis using GC-MS followed by fold change calculation. The results showed that the EC_{50} value of the *Xylaria* sp. wild type isolate was 1.96 $\mu\text{g/mL}$, while that of the flutriafol-adapted *Xylaria* sp. isolate was 2.5 $\mu\text{g/mL}$, indicating decreased sensitivity in the flutriafol-adapted isolate. GC-MS analysis successfully identified 27 secondary metabolites, with 16 metabolites shared by both isolates. Some secondary metabolites increased in the flutriafol-adapted *Xylaria* sp., while others decreased or were present only in one isolate. Based on this study, it can be concluded that adaptation to flutriafol is associated with changes in the secondary metabolite profile as a form of fungal metabolic adjustment to fungicide pressure.

Keywords: Demethylation Inhibitors (DMI), flutriafol, fungicide resistance, GC-MS, secondary metabolites, *Xylaria* sp.

**PERBANDINGAN PROFIL METABOLIT SEKUNDER JAMUR *Xylaria* sp.
PENYEBAB PENYAKIT BUSUK AKAR DAN PANGKAL BATANG TEBU
WILD TYPE DAN TERADAPTASI FUNGISIDA FLUTRIAFOL
MENGUNAKAN GC-MS**

SKRIPSI

Oleh

Sifa Permatasari

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA PERTANIAN**

pada

**Jurusan Proteksi Tanaman
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi

**: PERBANDINGAN PROFIL METABOLIT
SEKUNDER JAMUR *Xylaria* sp. PENYEBAB
PENYAKIT BUSUK AKAR DAN PANGKAL
BATANG TEBU *WILD TYPE* DAN
TERADAPTASI FUNGISIDA FLUTRIAFOL
MENGUNAKAN GC-MS**

Nama Mahasiswa

: Sifa Permatasari

Nomor Pokok Mahasiswa : 2214191019

Fakultas

: Pertanian



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Tri Maryono, S.P., M.Si.
NIP. 198002082005011002

Ir. Muhammad Nurdin, M.Si.
NIP. 196107201986031001

2. Ketua Jurusan Proteksi Tanaman

Dr. Tri Maryono, S.P., M.Si.
NIP. 198002082005011002

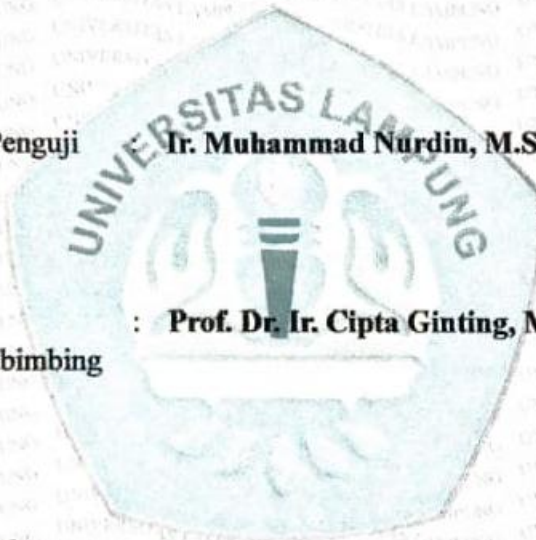
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Tri Maryono, S.P., M.Si.

Sekretaris Penguji : Ir. Muhammad Nurdin, M.Si.

**Penguji
Bukan Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Cipta Ginting, M.Sc.**



(Handwritten signatures of Dr. Tri Maryono, Ir. Muhammad Nurdin, and Prof. Dr. Ir. Cipta Ginting)

2. Dekan Fakultas

Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP. 196411181989021002

(Handwritten signature of Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat)

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 21 April 2026

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini, menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "**Perbandingan Profil Metabolit Sekunder Jamur *Xylaria* sp. Penyebab Penyakit Busuk Akar dan Pangkal Batang Tebu *Wild Type* dan Teradaptasi Fungisida Flutriafol Menggunakan GC-MS**" merupakan hasil karya saya sendiri dan bukan hasil karya orang lain. Semua hasil yang tertulis dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan hasil salinan atau dibuat orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 28 April 2026

Pembuat Pernyataan



Sifa Permatasari

NPM. 2214191019

RIWAYAT HIDUP

Penulis lahir di Bekasi pada 28 Mei 2004 dan merupakan anak kedua dari kedua orang tua. Pendidikan penulis dimulai di TK Atsuraya, yang dilanjutkan ke Sekolah Dasar (SD) Karang Asih 12, Kecamatan Cikarang Utara, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat diselesaikan pada tahun 2016. Sekolah Menengah Pertama (SMP) diselesaikan di SMP Negeri 1 Cikarang Utara, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat pada tahun 2019. Sekolah Menengah Atas (SMA) diselesaikan di SMA Negeri 3 Cikarang Utara, Kecamatan Cikarang Utara, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat pada tahun 2022.

Pada tahun 2022 penulis masuk Jurusan Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, melalui jalur SNMPTN. Selama kuliah penulis aktif berorganisasi di tingkat universitas maupun fakultas. Penulis mengikuti organisasi DPM UNILA (Dewan Perwakilan Mahasiswa Universitas Lampung) sebagai staff Badan PSDM dan HIMAPROTEKTA (Himpunan Mahasiswa Proteksi Tanaman) sebagai anggota bidang kewirausahaan. Penulis juga aktif mengikuti program penelitian bersama dosen dan menjadi asisten praktikum pada mata kuliah Dasar-Dasar Perlindungan Tanaman (2024 dan 2025), Karantina Tumbuhan (2025), dan Pengantar Genetika Proteksi Tanaman (2025). Penulis telah melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Rejo Basuki, Kecamatan Seputih Raman, Kabupaten Lampung Tengah, dan melaksanakan Praktik Umum (PU) di Balai Besar Uji Standar Karantina Hewan, Ikan, dan Tumbuhan (BBUSKHIT) pada tahun 2025.

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur dan segala kerendahan hati
Kupersembahkan karya tulis ini sebagai ungkapan terima kasih penulis kepada

Orang tua

Terima kasih atas segala doa, bimbingan serta pengorbanan tanpa henti sepanjang perjalanan hidup dan pendidikan penulis. Terima kasih atas kasih sayang yang telah diberikan semoga karya ini dapat menjadi bakti dari penulis.

Kakak dan Adik

Terima kasih atas segala doa dan dukungan sehingga menjadi sumber inspirasi dan motivasi bagi penulis. Terima kasih atas kasih sayang yang telah diberikan hingga hari ini.

Teman-teman penelitian

Terima kasih telah berbagi semangat, memberikan bantuan dan dukungan selama masa penelitian. Terima kasih telah berbagi pengalaman dan pengetahuan kepada penulis.

serta Teman-teman yang telah mendukung dan menghibur dengan segala keceriaan sehingga menjadi motivasi bagi penulis untuk terus melanjutkan hidup dan fokus pada masa depan.

MOTTO

“dan sesungguhnya usahanya itu kelak akan diperlihatkan (kepadanya), kemudian akan diberi balasan kepadanya dengan balasan yang paling sempurna,”

(Q.S An-Najm: 40-41)

“dan katakanlah “ya Tuhanku, tambahkanlah ilmu kepadaku”,”

(Q.S Thaha: 114)

“Do your best! Focus on your self.”

(Sifa Permatasari)

SANWACANA

Puji syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat, rahmat, karunia dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan karya tulis yang berjudul **“Perbandingan Profil Metabolit Sekunder Jamur *Xylaria* sp. Penyebab Penyakit Busuk Akar dan Pangkal Batang Tebu *Wild Type* dan Teradaptasi Fungisida Flutriafol Menggunakan GC-MS”**. Penulisan karya tulis ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Pertanian di Universitas Lampung. Penyusunan karya tulis ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak, oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, yang telah memberikan fasilitas kepada penulis dalam menjalani perkuliahan serta melaksanakan penelitian,
2. Bapak Dr. Tri Maryono, S.P., M.Si., selaku Ketua Jurusan Proteksi Tanaman Universitas Lampung, Dosen Pembimbing Pertama, dan Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan, saran, motivasi, nasihat, arahan dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan karya tulis ini hingga selesai,
3. Bapak Ir. Muhammad Nurdin, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Kedua, atas bimbingan, arahan, nasihat, dan saran yang telah diberikan hingga karya tulis ini dapat diselesaikan,
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Cipta Ginting, M.Sc. selaku Dosen Penguji/Pembahas, yang telah memberikan arahan dan saran dalam pelaksanaan penelitian serta penyempurnaan karya tulis ini hingga dapat diselesaikan,
5. Bapak dan Ibu, yang selalu mendukung dan memberikan semangat kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan karya tulis ini dengan baik,

6. Adik Wafia Zahidah, Kakak Fajar Arifin, Kakak Pina Fanduinata, dan Ana Fadhilah Khoirunnisa yang telah memberi dukungan dan semangat untuk menyelesaikan karya tulis ini,
7. Ibu Widyaningrum Alita Sari, S.P. yang telah memberikan saran, doa dan dukungan serta semangat kepada penulis selama kegiatan penelitian,
8. Teman-teman penelitian Arina Mawadah, Ni Made Ria Prateka, dan Richo Ahmad Hidayat yang telah membantu penulis selama penelitian dan menyelesaikan karya tulis ini,
9. Bening, Clarisa, Desma, Diah, Fauziah, Intan, Maya, Mariatul, Naya, Pita, Pramesty, Sabrina, Salsa, Tasya, Tiya, Viola, dan Wizi yang telah memberi motivasi dan menghibur penulis disaat jenuh,
10. Teman-teman jurusan Proteksi Tanaman Angkatan 2022 yang telah banyak memberikan dukungan, semangat, dan kebersamaan selama masa studi, serta berbagi pengalaman dan pengetahuan kepada penulis,
11. Semua pihak yang terlibat dan tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih atas bantuan, dukungan, dan kontribusinya yang sangat berarti dalam penyelesaian skripsi ini, dan
12. Sifa Permatasari yang selalu berdoa, berusaha, bersemangat dan tidak kehilangan motivasi untuk terus belajar hingga dapat menyelesaikan karya tulis ini.

Dengan segenap ketulusan hati, penulis hanya mampu mengucapkan terima kasih. Semoga karya tulis ini juga dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan menjadi referensi yang bermanfaat bagi masyarakat.

Penulis,

Bandar Lampung, 30 April 2026

Sifa Permatasari

NPM. 2214191019

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Kerangka Pemikiran	2
1.4 Hipotesis	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penyakit Busuk Akar dan Pangkal Batang Tanaman Tebu.....	5
2.2 Klasifikasi <i>Xylaria</i> sp.	7
2.3 Fungisida Flutriafol	8
2.4 Analisis Metabolit.....	9
III. METODOLOGI PENELITIAN	12
3.1 Waktu dan Tempat	12
3.2 Alat dan Bahan	12
3.3 Pelaksanaan Penelitian	12
3.3.1 Pembuatan media PSA dan PSB	12
3.3.2 Isolasi jamur <i>Xylaria</i> sp.	13
3.3.3 Adaptasi jamur <i>Xylaria</i> sp. pada fungisida flutriafol.....	13
3.3.4 Uji sensitivitas <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i> vs <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi fungisida flutriafol.....	14
3.3.5 Analisis profil metabolit sekunder <i>Xylaria</i> sp.	15
3.3.6 Analisis data.....	16

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	17
4.1 Hasil.....	17
4.1.1 Hasil isolasi	17
4.1.2 Adaptasi jamur <i>Xylaria</i> sp. pada fungisida flutriafol	18
4.1.3 Sensitivitas <i>Xylaria</i> sp. terhadap fungisida flutriafol	18
4.1.4 Hasil analisis GC-MS <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i> vs <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi fungisida flutriafol	21
4.2 Pembahasan	28
V. SIMPULAN DAN SARAN	32
5.1 Simpulan.....	32
5.2 Saran.....	32
DAFTAR PUSTAKA	33
LAMPIRAN	38

DAFTAR TABEL

Tabel	halaman
1. Diameter koloni jamur <i>Xylaria</i> sp. pada media yang mengandung fungisida flutriafol dengan berbagai konsentrasi	19
2. Transformasi \log_{10} konsentrasi fungisida flutriafol dan nilai penghambatan pertumbuhan diameter koloni jamur <i>Xylaria</i> sp.	20
3. Profil metabolit sekunder <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i> sensitif fungisida flutriafol hasil GC-MS	23
4. Profil metabolit sekunder <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi fungisida flutriafol hasil GC-MS.....	24
5. Persentase area dan <i>fold change</i> metabolit sekunder pada <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i> dan <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi fungisida flutriafol	26
6. Hasil uji GC-MS <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i> sensitif fungisida flutriafol	39
7. Hasil uji GC-MS <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi terhadap fungisida flutriafol	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar	halaman
1. Gejala penyakit BAPB pada tanaman tebu (Maryono <i>et al.</i> , 2017).	6
2. Stroma <i>Xylaria</i> sp. pada tanaman tebu (Maryono <i>et al.</i> , 2017).....	6
3. Struktur kimia flutriafol (Yu <i>et al.</i> , 2012).	9
4. Gejala, tanda penyakit pada tanaman tebu dan konidia <i>Xylaria</i> sp.	17
5. Koloni jamur <i>Xylaria</i> sp. hasil isolasi berumur 19 hsi.	18
6. Diameter koloni jamur <i>Xylaria</i> sp. pada media PSA yang mengandung fungisida flutriafol dengan berbagai konsentrasi pada 11 hsi	18
7. Regresi linear antara \log_{10} konsentrasi fungisida flutriafol 50% dengan persentase penghambatan pertumbuhan diameter koloni jamur <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i>	20
8. Regresi linear antara \log_{10} konsentrasi fungisida flutriafol 50% dengan persentase penghambatan pertumbuhan diameter koloni <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi fungisida flutriafol.	21
9. Kromatogram <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i>	22
10. Kromatogram <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi fungisida flutriafol.....	22
11. Diagram venn perbandingan kandungan metabolit sekunder <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i> dengan <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi fungisida flutriafol.....	25
12. Kromatogram dan spektrum massa senyawa hasil analisis kualitatif GC-MS pada isolat <i>Xylaria</i> sp. <i>wild type</i>	72
13. Kromatogram dan spektrum massa senyawa hasil analisis kualitatif GC-MS pada isolat <i>Xylaria</i> sp. teradaptasi fungisida flutriafol.....	104

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tebu merupakan bahan utama dalam pembuatan gula kristal putih (Soepandi *et al.*, 2024). Gula termasuk bahan pokok bersama dengan beras, minyak goreng, terigu, kedelai, daging sapi, daging ayam, dan telur ayam (Menko Perekonomian, 2010). Gula menjadi bahan baku esensial dalam kehidupan sehari-hari baik dalam bentuk gula kristal putih untuk konsumsi masyarakat maupun gula rafinasi untuk kebutuhan industri makan dan minuman (Jaelani *et al.*, 2022).

Kebutuhan gula konsumsi secara nasional semakin meningkat dari tahun ke tahun sejalan dengan meningkatnya jumlah penduduk. Kebutuhan gula konsumsi pada tahun 2023 mencapai 3,31 juta ton. Kebutuhan ini belum diperhitungkan adanya peningkatan kebutuhan gula untuk industri yang juga semakin meningkat. Sementara itu, produksi gula di Indonesia pada 2023 sebanyak 2,27 juta ton dan pada 2024 mencapai 2,46 juta ton (Kementerian Pertanian, 2024).

Rendahnya produksi gula disebabkan oleh terbatasnya hasil panen tebu sebagai bahan baku utama (Kustiyo *et al.*, 2022). Hal tersebut dapat terjadi karena berbagai faktor, salah satu penyebabnya adalah penyakit tanaman. Penyakit busuk akar dan pangkal batang (BAPB) merupakan penyakit yang disebabkan oleh *Xylaria* sp. Penyakit ini dapat menyebabkan turunnya produktivitas tanaman tebu. Keparahan penyakit 26% menurunkan hasil hingga 15% di Lampung (Sitepu, 2010; Maryono *et al.*, 2017). Pengendalian terhadap *Xylaria* sp. perlu dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan produktivitas tanaman tebu.

Pengendalian menggunakan fungisida dapat dilakukan sebagai upaya untuk menekan keterjadian penyakit. Fungisida bahan aktif flutriafol termasuk dalam kelompok *Sterol Demethylation Inhibitors* (DMI) yang bekerja secara sistemik. Fungisida sistemik menargetkan lokasi spesifik, sehingga mutasi gen tunggal pada jamur patogen menyebabkan resistensi (Yin *et al.*, 2023). Peningkatan ekspresi gen target merupakan mekanisme resistensi yang umum terjadi terhadap fungisida DMI (Zhang *et al.*, 2021).

Penelitian ini akan menganalisis perubahan metabolit pada *Xylaria* sp. *wild type* dan teradaptasi terhadap fungisida flutriafol. Analisis ini membantu untuk memahami mekanisme adaptasi pada jamur patogen, sehingga dapat mendukung efektivitas jangka panjang fungisida flutriafol dan menjaga keberlanjutan penggunaannya dalam pengendalian *Xylaria* sp. pada tanaman tebu.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan membandingkan profil metabolit sekunder *Xylaria* sp. penyebab penyakit busuk akar dan pangkal batang tebu *wild type* dan *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol.

1.3 Kerangka Pemikiran

Fungisida memiliki peran yang sangat penting dalam memastikan keamanan pangan (Chen *et al.*, 2025). Fungisida telah diaplikasikan pada tanaman selama beberapa dekade dengan tujuan mengelola penyakit yang disebabkan oleh jamur. Penggunaan fungisida secara terus-menerus dengan cara kerja yang sama dapat menyebabkan perkembangan resistensi (Li *et al.*, 2023).

Resistensi terhadap fungisida umumnya disebabkan oleh mutasi genetik, baik pada target kerja fungisida maupun pada sistem pengatur dalam jamur yang memungkinkan mereka melawan berbagai zat kimia. Selain itu, penyesuaian dalam profil metabolit juga dapat menjadi jalur alternatif dalam mengembangkan resistensi serta meningkatkan kemampuan adaptasi patogen (Li *et al.*, 2023). Hal

ini dapat terjadi karena metabolit sekunder diproduksi organisme sebagai bentuk pertahanan diri terhadap gangguan dari organisme lain dan lingkungan (Li *et al.*, 2020). Analisis profil metabolit ini dapat digunakan untuk membedakan jenis senyawa yang terbentuk pada isolat *Xylaria* sp. *wild type* dan teradaptasi terhadap stres lingkungan akibat fungisida.

Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) merupakan metode analisis yang digunakan dalam studi metabolomik secara masif untuk mengidentifikasi senyawa-senyawa kimia dengan teknik kromatografi gas (Junaidi *et al.*, 2018). Cevallos-Cevallos *et al.* (2011) telah merekomendasikan penggunaan GC-MS untuk penelitian metabolomik mikroba. Setelahnya, metabolomik nontarget telah mengidentifikasi ratusan metabolit yang bertanggung jawab atas resistensi tanaman terhadap patogen (Yogendra *et al.*, 2015). Berdasarkan hal tersebut, metabolomik berpotensi untuk mengkarakterisasi biologis resistensi dan sensitivitas *Xylaria* sp. terhadap fungisida flutriafol.

Pemahaman mengenai penggunaan metode GC-MS sangat penting untuk mengkaji mekanisme resistensi jamur patogen terhadap paparan fungisida. Maridueña-Zavala *et al.* (2017) yang meneliti dampak paparan metalaksil terhadap *Phytophthora infestans*, melaporkan bahwa paparan metalaksil pada *P. infestans*, baik pada konsentrasi rendah (0,5 mg/L) maupun tinggi (100 mg/L), menyebabkan perubahan ekspresi berbagai metabolit. Perubahan ini termasuk peningkatan kadar asam tetradekanoat, heksadekanoat, dan oktadekanoat yang berasal dari jalur biosintesis asam lemak, serta etanolamin dari jalur metabolisme gliserofosfolipid.

Perubahan ekspresi metabolit pada jamur patogen menunjukkan adanya peningkatan kekakuan membran, yang berkaitan dengan mekanisme resistensi jamur patogen terhadap fungisida. Li *et al.* (2018), menggunakan pendekatan spektrometri massa untuk menganalisis profil metabolit yang terkait dengan resistensi terhadap fungisida azole pada *Candida albicans*. Hasilnya menunjukkan perubahan biomarker potensial, terutama pada metabolisme asam amino, sfingolipid, dan fosfolipid, yang menunjukkan kompleksitas proses resistensi.

Proses ini diduga melibatkan penurunan ROS endogen, peningkatan ekspresi transporter fungisida, serta perubahan fungsi membran dan mitokondria.

Oleh karena itu, pendekatan metabolomik dapat dimanfaatkan untuk mengungkap proses biokimia yang berlangsung pada jamur patogen penyebab penyakit saat terpapar bahan aktif fungisida tertentu. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini akan menganalisis perbedaan dan perubahan profil metabolit sekunder *Xylaria* sp. *wild type* dan *Xylaria* sp. teradaptasi terhadap fungisida flutriafol.

1.4 Hipotesis

Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini yaitu profil metabolit sekunder pada *Xylaria* sp. penyebab penyakit busuk akar dan pangkal batang tebu *wild type* fungisida flutriafol berbeda dengan profil metabolit sekunder *Xylaria* sp. yang teradaptasi fungisida flutriafol.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penyakit Busuk Akar dan Pangkal Batang Tanaman Tebu

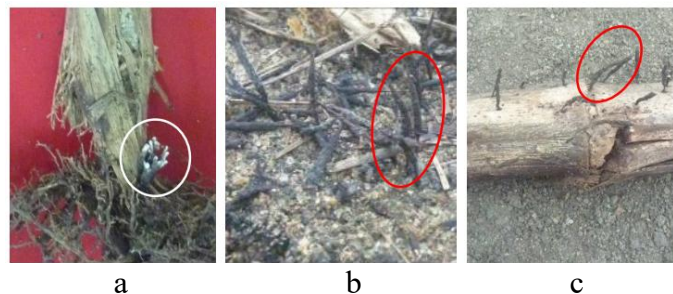
Penyakit busuk akar dan pangkal batang (BAPB) pada tanaman tebu disebabkan oleh *Xylaria* sp. *Xylaria* sp. menyerang pada bagian akar dan pangkal batang tanaman tebu. Penyakit BAPB merupakan penyakit baru di Indonesia dan saat ini dilaporkan hanya ada di Sumatera. Penyakit ini ada di Taiwan, Amerika Serikat, Puerto Rico, dan Indonesia. Penyakit *Xylaria* yang ada di Sumatera Selatan disebabkan oleh *X. arbuscula* (Maryono *et al.*, 2019), sedangkan di Lampung disebabkan oleh *Xylaria* cf. *warburgii*. Penyakit ini dapat menjadi penyebab menurunnya bobot batang, menurunkan rendemen, hingga mematikan tanaman (Maryono *et al.*, 2017).

Gejala yang ditimbulkan penyakit ini yaitu daun menguning, akar dan pangkal batang tebu menjadi busuk, tanaman menjadi busuk dan akhirnya mati (Gambar 1). Gejala lainnya adalah munculnya stroma dari pangkal batang tanaman terinfeksi atau dari tanah di sekitarnya. Infeksi pada tanaman pertama dapat menyebabkan tanaman *ratoon* tidak tumbuh (Widowati *et al.*, 2022). Gejala awal ditandai dengan daun menguning dan mengering dari ujung daun. Setelah beberapa lama, semua daun akan mengering yang berarti perakaran dan pangkal batang sudah rusak sepenuhnya. Akar membusuk dan berwarna hitam sehingga akan mudah dicabut (Maryono *et al.*, 2017).



Gambar 1. Gejala penyakit BAPB pada tanaman tebu: a) Daun menguning dan mengering dari ujung daun, b) Rumpun tanaman tebu mati, c) Akar tanaman sakit yang tampak menghitam, dan d) Penampang membujur pangkal batang tebu sakit dan massa hifa. Ciri khas serangan *Xylaria* sp. ditunjukkan dengan tanda panah (Maryono *et al.*, 2017).

Tanda penyakit BAPB berupa stroma pada batang tebu sakit dan tanah di sekitar tanaman sakit. Terdapat dua bentuk stroma (Gambar 2). Stroma pertama yang ditemukan berwarna hitam, berkelompok, bercabang banyak, dan bagian ujungnya berwarna putih. Stroma kedua berbentuk batang silindris yang meruncing ke ujung, tunggal, bertangkai pendek, berwarna hitam atau kecoklatan, dan tidak bercabang atau bercabang pada pangkalnya. Keberadaan stroma merupakan ciri khas keberadaan *Xylaria* sp. (Maryono *et al.*, 2017).



Gambar 2. Stroma *Xylaria* sp. pada tanaman tebu: a) Stroma pada pangkal tanaman tebu sakit, b) Stroma yang keluar dari tanah di sekitar tanaman sakit, dan c) Stroma yang tumbuh dari sisa-sisa tanaman sakit (Maryono *et al.*, 2017).

Penyakit BAPB diduga memungkinkan terjadinya infeksi berulang sehingga penyakit akan berkembang melalui penularan spora. *Xylaria* sp. dapat membentuk konidia maupun askospora. *Xylaria* sp. membentuk stroma aseksual (menghasilkan konidia) pada tanaman tebu sakit. Kondisi cuaca berupa curah hujan dan kelembaban (RH) berpengaruh positif. Di sisi lain, suhu dan lama penyinaran berpengaruh negatif. Curah hujan dan kelembaban tinggi merupakan

kondisi yang sesuai untuk perkembangan penyakit dari kelompok jamur (Maryono *et al.*, 2020).

Pengendalian penyakit dapat dilakukan dengan pembongkaran atau tanam ulang petak yang terserang. Pengendalian lainnya dapat dilakukan adalah dengan menggunakan varietas tahan, namun hingga saat ini belum ada varietas tebu yang tahan terhadap serangan *Xylaria* sp. (Widowati *et al.*, 2022). Pengendalian dengan fungisida dapat dilakukan untuk menekan keterjadian penyakit *Xylaria* pada tebu. Salah satu bahan aktif fungisida yang dapat digunakan adalah flutriafol. Fungisida ini merupakan penghambat biosintesis sterol pada membran sel jamur. Dengan ini, perkembangan jamur *Xylaria* sp. akan terhambat dan akhirnya mati.

2.2 Klasifikasi *Xylaria* sp.

Menurut NCBI (2026), klasifikasi *Xylaria* sp. adalah sebagai berikut:

<i>Kingdom</i>	: Fungi
<i>Division</i>	: Ascomycota
<i>Class</i>	: Sordariomycetes
<i>Order</i>	: Xylariales
<i>Famili</i>	: Xylariaceae
<i>Genus</i>	: <i>Xylaria</i>
<i>Spesies</i>	: <i>Xylaria</i> sp.

Genus *Xylaria* adalah genus terbesar dalam famili Xylariaceae, dengan lebih dari 852 spesies. Umumnya ditemukan di berbagai substrat seperti kayu, daun, buah, biji, dan sarang rayap. Sebagian besar dari genus ini bersifat saprobik sebagai pengurai atau endofit, dan sebagian sebagai patogen. *Xylaria* sp. memiliki stroma (struktur tubuh jamur) berwarna gelap atau hitam dengan bentuk yang bervariasi. Genus ini menghasilkan ascospora berbentuk ellipsoid dengan dinding tebal dan memiliki celah perkecambahan yang disebut germ slit (Rathnayaka *et al.*, 2025).

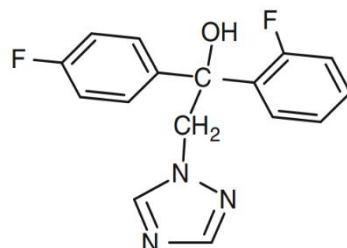
2.3 Fungisida Flutriafol

Fungisida adalah racun yang diformulasikan untuk membunuh jamur penyebab penyakit tanaman. Penggunaan fungisida ditujukan untuk memutus asosiasi parasitik antara tumbuhan dengan jamur patogen (Delvian *et al.*, 2021). Fungisida dibagi menjadi fungisida kontak dan sistemik. Fungisida kontak disebut juga protektan yang melindungi tanaman dari serangan patogen pada tempat aplikasi. Fungisida jenis ini tidak dapat menyembuhkan tanaman yang sudah sakit. Sebaliknya, fungisida sistemik diserap jaringan tanaman dan ditranslokasikan ke seluruh bagian tanaman. Fungisida sistemik bekerja bersama dengan proses metabolisme tanaman. Fungisida sistemik hanya bekerja secara spesifik pada satu tempat dari bagian sel jamur (Sumardiyono, 2008).

Flutriafol merupakan fungisida dalam kelompok DMI (*Demethylation Inhibitors*) atau penghambat biosintesis sterol pada membran sel jamur. Flutriafol menghambat target enzim 14α -demethylase dalam jalur biosintesis sterol (Erg11/CYP51). Flutriafol termasuk dalam subkelompok utama fungisida DMI golongan triazole. Flutriafol memiliki kode FRAC 3 yang mekanisme kerjanya berisiko sedang (*medium risk*) terhadap perkembangan resistensi pada jamur patogen. Fungisida DMI seperti flutriafol efektif terhadap berbagai spesies jamur, namun sudah diketahui adanya beberapa mekanisme resistensi, seperti mutasi pada gen target (CYP51), perubahan pada transporter *ATP-Binding Cassette* (ABC), dan mekanisme lainnya. Oleh karena itu, penggunaan flutriafol harus memperhatikan pedoman manajemen resistensi yang direkomendasikan oleh FRAC (FRAC, 2024).

Flutriafol dengan nama IUPAC 1-(2-fluorophenyl)-1-(4-fluorophenyl)-2-(1,2,4-triazol-1-yl) ethanol (Gambar 3), adalah fungisida sistemik yang digunakan untuk mengatasi penyakit pada berbagai tanaman, rumput, dan tanaman hias (Roman *et al.*, 2024). Flutriafol termasuk dalam fungisida DMI. Cara kerjanya adalah mengganggu sterol jamur 14α -demethylase, yang juga disebut CYP51. Fungsinya adalah untuk mengkatalisis biosintesis ergosterol yang ditemukan dalam membran jamur. Ergosterol berperan penting dalam memediasi permeabilitas, kekakuan,

dan fluiditas membran jamur. Fungisida DMI dapat mempengaruhi fungsi enzim penting yang terikat membran jamur (Zhang *et al.*, 2021).



Gambar 3. Struktur kimia flutriafol (Yu *et al.*, 2012).

Aplikasi fungisida DMI terus menerus dapat menyebabkan jamur patogen resisten. Mekanisme resistensi DMI telah ditinjau pada fitopatogen penting seperti *Fusarium graminearum*, *F. fujikuroi*, *Penicillium digitatum*, dan *Venturia effusa*. Mekanisme resistensi yang umum meliputi mutasi enzim target DMI (CYP51), peningkatan jumlah salinan gen paralog (CYP51), ekspresi berlebihan gen CYP51 dengan memasukkan elemen CIS pada promoter gen, dan ekspresi berlebihan transporter ABC yang mengkode pompa efluks. Jamur dapat mengandung satu hingga empat gen CYP51 dalam satu spesies. Salah satunya *F. graminearum* yang mengandung tiga CYP51 paralog (dinamakan CYP51A/B/C), dan ketiga paralog tersebut terkait dengan resistensi DMI pada jamur ini (Yin *et al.*, 2023).

Selain ketahanan genetik yang stabil, priming ketahanan DMI telah diamati pada jamur patogen tanaman. Priming didefinisikan sebagai proses dimana paparan sebelumnya terhadap rangsangan stres subletal seperti fungisida dapat meningkatkan kemampuan patogen untuk menahan paparan berikutnya terhadap stresor yang sama atau serupa. Stres akibat paparan berikutnya terhadap fungisida dapat menyebabkan ketidakstabilan genom pada jamur patogen tanaman yang dapat mendorong resistensi fungisida atau sifat adaptif lainnya (Yin *et al.*, 2023).

2.4 Analisis Metabolit

Metabolit adalah produk dari proses metabolisme dalam organisme hidup. Senyawa metabolit umumnya terdapat pada semua makhluk hidup (Ariyanti *et al.*,

2024). Metabolisme adalah seluruh reaksi biokimia pada organisme dengan tujuan mempertahankan kehidupan. Metabolit primer berperan dalam respirasi, sedangkan metabolit sekunder berperan dalam fungsi pertahanan (Rachmawan & Dalimunthe, 2017). Kajian mengenai metabolit dapat digunakan untuk menilai perbedaan fenotipe pada organisme.

Metabolomik, yang secara umum didefinisikan sebagai studi tentang metabolit dalam suatu sistem, telah diterapkan dalam studi tanaman dan mikroba. Alat metabolomik termasuk GC-MS telah digunakan untuk menilai ketahanan spesies tanaman terhadap stres biotik dan abiotik. Selain itu, metabolomik non target telah mengidentifikasi ratusan metabolit yang bertanggung jawab atas resistensi kuantitatif tanaman terhadap patogen (Maridueña-Zavala *et al.*, 2017). Dengan ini, metabolomik berpotensi untuk digunakan dalam mengkaraktirasi mekanisme biologis resistensi jamur patogen terhadap fungisida.

Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) dapat digunakan sebagai metode utama untuk menganalisis profil metabolit karena memiliki sensitivitas dan ketelitian tinggi, terutama untuk senyawa bermassa molekul kecil yang umum dihasilkan mikroorganisme. Dalam analisis ini, sampel jamur diekstrak, dikeringkan, dan diderivatisasi sebelum dianalisis dengan GC-MS. Teknik ini memungkinkan identifikasi metabolit yang meningkat atau menurun setelah paparan fungisida. Data kemudian dianalisis secara statistik untuk menentukan senyawa yang berperan dalam resistensi, seperti asam lemak, gula alkohol, dan asam organik, sehingga membantu menjelaskan mekanisme biokimia adaptasi jamur terhadap tekanan fungisida (Maridueña-Zavala *et al.*, 2024).

Penelitian tentang mekanisme resistensi jamur patogen terhadap fungisida terus berkembang, terutama melalui kajian profil metabolit setelah paparan fungisida untuk memahami meningkatnya kasus ketahanan terhadap pengendalian kimia. Studi oleh Maridueña-Zavala *et al.* (2024) menunjukkan bahwa metabolit berperan penting dalam resistensi *Pseudocercospora fijiensis* terhadap fungisida thiabendazole. Isolat resisten diketahui menghasilkan *myristic acid* dan *octadecanoic acid* dalam jumlah lebih tinggi, yang berfungsi menjaga stabilitas

membran sel serta mendukung produksi β -tubulin sebagai target utama fungisida. Selain itu, aktivasi jalur biosintesis asam lemak, metabolisme energi, dan transporter ABC turut memperkuat kemampuan adaptasi jamur terhadap tekanan fungisida.

Kajian profil metabolit setelah paparan fungisida penting untuk memahami mekanisme resistensi jamur patogen. Cuan *et al.* (2024) menunjukkan bahwa metabolit berperan besar dalam resistensi *Penicillium digitatum* terhadap fungisida prochloraz. Paparan prochloraz memicu perubahan pada jalur metabolisme energi, sterol, lipid, karbohidrat, dan nitrogen, sehingga sel mampu menghasilkan senyawa seperti ergosterol, *adenosine triphosphate* (ATP), dan antioksidan untuk mempertahankan integritas membran serta melakukan detoksifikasi. Gen MFS2 yang mengkode transporter turut mengatur proses ini. Penghapusan gen tersebut menurunkan produksi metabolit penting dan meningkatkan sensitivitas jamur terhadap fungisida.

Metabolit memainkan peran penting dalam mekanisme resistensi jamur terhadap fungisida melalui perubahan jalur metabolisme yang kompleks. Teknik metabolomik seperti GC-MS memungkinkan identifikasi metabolit spesifik yang mendukung adaptasi sel terhadap tekanan kimia. pemahaman perubahan ini dapat mengungkap strategi biokimia jamur dalam membentuk pertahanan diri dari paparan fungisida.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada September 2025 sampai Februari 2026 di Laboratorium Penyakit Tumbuhan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan Laboratorium Sentral Universitas Padjajaran.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah autoklaf, *laminar air flow*, *centrifuge tube*, *shaker*, timbangan, labu erlenmeyer, botol ukuran 100 mL, *oven*, *micropipet*, *microtip*, cawan petri, *beaker glass*, gelas ukur, bunsen, pinset, *scalpel*, kertas label, spidol, tisu, *plastic wrap*, plastik tahan panas, nampan, bor gabus, alat tulis, dan kamera. Sedangkan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sampel tanaman tebu bergejala BAPB, media *Potato Sucrose Agar* (PSA), media *Potato Sucrose Broth* (PSB), kentang, agar batang, gula, asam laktat ($C_3H_6O_3$), alkohol 70%, spiritus, korek api, *aquades*, dan fungisida berbahan aktif flutriafol.

3.3 Pelaksanaan Penelitian

3.3.1 Pembuatan media PSA dan PSB

Media PSA disiapkan dengan menggunakan bahan-bahan berupa kentang 200 g, agar batang 20 g, sukrosa 20 g, dan akuades 1000 mL. Proses pembuatannya dimulai dengan dikupas dan dipotong kentang menjadi bentuk dadu, kemudian ditimbang sebanyak 200 g. Potongan kentang dicuci hingga bersih lalu

direbus dalam 1000 mL *aquades* di dalam *beaker glass* selama kurang lebih 15 menit hingga mendidih. Kemudian ekstrak kentang disaring dan dimasukkan ke dalam labu erlenmeyer yang berisi agar dan sukrosa masing-masing sebanyak 20 g. Pembuatan media PSB dilakukan dengan cara yang sama dengan bahan berupa kentang 200 g, sukrosa 20 g, dan akuades 1000 mL. Labu erlenmeyer media PSA dan PSB ditutup menggunakan aluminum foil dan dimasukkan ke dalam plastik tahan panas untuk proses sterilisasi di autoklaf dengan suhu 121°C dan tekanan 1 atm selama 30 menit. Kemudian media didinginkan terlebih dahulu sebelum ditambahkan asam laktat sebanyak 1.400 µL dan diaduk hingga homogen. Media PSA yang telah homogen kemudian dituangkan ke dalam cawan petri untuk dapat disimpan atau langsung digunakan setelah mengeras pada cawan petri. Media PSB yang telah homogen kemudian dituangkan ke dalam botol ukuran 100 mL untuk dapat disimpan atau langsung digunakan.

3.3.2 Isolasi jamur *Xylaria* sp.

Isolasi jamur *Xylaria* sp. dilakukan dari bagian pangkal batang tanaman tebu yang menunjukkan gejala penyakit dengan rasio 1:3 (satu bagian jaringan bergejala dan tiga bagian jaringan sehat). Isolasi dimulai dengan memotong bagian batang dan menjadi bagian-bagian kecil berukuran sekitar 0,2 cm. Potongan tersebut kemudian disterilkan dengan cara merendamnya dalam larutan kloroks (NaOCl) 1% selama 5 menit, lalu dibilas sebanyak tiga kali menggunakan air steril. Setelah proses sterilisasi, potongan jaringan ditiriskan di atas tisu steril dan selanjutnya diletakkan secara terpisah ke dalam cawan petri yang berisi media PSA. Cawan petri ditutup dan direkatkan kemudian diinkubasi pada suhu ruang.

3.3.3 Adaptasi jamur *Xylaria* sp. pada fungisida flutriafol

Adaptasi *Xylaria* sp. pada fungisida flutriafol dilakukan berdasarkan metode oleh Du *et al.* (2021) dengan beberapa modifikasi. Isolat yang digunakan merupakan isolat *Xylaria* sp. yang belum pernah terpapar fungisida flutriafol. Proses adaptasi dilakukan dengan menumbuhkan jamur pada media PSA yang mengandung 1 µg/mL flutriafol dan diinkubasi pada suhu 27°C dalam kondisi gelap. jamur yang

berhasil tumbuh kemudian dipindahkan ke media PSA dengan konsentrasi flutriafol yang ditingkatkan dua kali lipat secara bertahap. Proses adaptasi ini dilakukan selama 4 siklus berturut-turut dengan peningkatan konsentrasi fungisida flutriafol secara bertahap yaitu pada konsentrasi 2 µg/mL, 4 µg/mL, 8 µg/mL, dan 16 µg/mL. Setelah tidak ditemukan pertumbuhan miselium pada media dengan konsentrasi flutriafol sebesar 32 µg/mL, isolat teradaptasi yang terbentuk dipindahkan ke media PSA tanpa fungisida.

3.3.4 Uji sensitivitas *Xylaria* sp. *wild type* vs *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol

Uji sensitivitas jamur *Xylaria* sp. terhadap fungisida flutriafol dilakukan dengan menentukan nilai konsentrasi efektif 50% (EC₅₀), yaitu konsentrasi fungisida yang mampu menghambat pertumbuhan jamur sebesar 50%. Sensitivitas *Xylaria* sp. diuji berdasarkan metode Zhang *et al.* (2021) dengan beberapa modifikasi. Isolat yang digunakan merupakan isolat *Xylaria* sp. yang belum pernah terpapar fungisida flutriafol (*wild type*) dan isolat *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol. Media PSA disiapkan dengan enam tingkatan konsentrasi flutriafol, yaitu 0; 1; 1,5; 2; 3; dan 3,5 µg/mL. Potongan jamur berdiameter 5 mm diambil dari tepi koloni jamur yang telah berumur 7 hari, kemudian ditanam pada media PSA yang mengandung berbagai konsentrasi flutriafol. Inkubasi dilakukan pada suhu 27°C dalam kondisi gelap selama 10 hari. Setelah inkubasi, diameter koloni diukur dua kali pada dua arah yang saling tegak lurus. Percobaan dilakukan sebanyak satu kali dengan empat kali ulangan untuk setiap konsentrasi. Persentase penghambatan (P) dihitung dengan rumus (Fatma *et al.*, 2021):

$$P = \frac{D1 - D2}{D1} \times 100 \%$$

Keterangan:

P = Persentase penghambatan (%),

D1 = Rata-rata diameter koloni jamur pada kontrol (cm), dan

D2 = Rata-rata diameter koloni jamur pada setiap perlakuan (cm).

Nilai EC_{50} diperoleh dengan cara transformasi konsentrasi fungisida menjadi logaritma (\log_{10}), kemudian dilakukan regresi linier terhadap nilai persentase penghambatan (P) dan \log_{10} konsentrasi fungisida (Dutra *et al.*, 2020).

3.3.5 Analisis profil metabolit sekunder *Xylaria* sp.

3.3.5.1 Produksi metabolit sekunder jamur *Xylaria* sp. pada media cair

Produksi metabolit sekunder jamur *Xylaria* sp. dilakukan berdasarkan Maridueña-Zavala *et al.* (2024) dengan beberapa modifikasi. Produksi metabolit sekunder dilakukan pada jamur *Xylaria* sp. *wild type* dan *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol sebagai perlakuan berbeda. Produksi metabolit sekunder diawali dengan pembuatan media cair PSB, kemudian dimasukkan ke dalam botol masing-masing 100 mL. Sebanyak 3 potongan jamur diinokulasi pada media PSB, ditutup kapas dan *aluminium foil* kemudian dilapisi *plastic wrap* agar tidak terjadi kontaminasi. Masing-masing perlakuan dilakukan sebanyak empat ulangan. Media PSB diinkubasi dengan digoyang (*shaker*) selama 14 hari dengan kecepatan 150 rpm. Kemudian media PSB ditambahkan fungisida dengan konsentrasi berdasarkan nilai EC_{50} yang telah diperoleh yaitu 1,96 $\mu\text{g/mL}$ pada *Xylaria* sp. *wild type* dan 2,50 $\mu\text{g/mL}$ pada *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol. Media PSB kembali diinkubasi di atas *shaker* pada kondisi yang sama selama 2 hari. Jamur pada media PSB kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 1, dipisahkan antara supernatan dan hifanya. Supernatan yang dihasilkan disimpan dalam *centrifuge tube* kemudian dilakukan analisis GC-MS untuk memetakan perubahan profil metabolit.

3.3.5.2 Analisis GC-MS

Analisis GC-MS dilakukan di Laboratorium Sentral Universitas Padjajaran. Sampel dimasukkan ke dalam injektor yang dipanaskan pada suhu 200°C dengan *split ratio* 10:1, sehingga sebagian kecil sampel masuk ke kolom kromatografi. Helium sebagai gas pembawa dengan laju alir 1 mL/menit mengangkut senyawa yang terpisah berdasarkan volatilitasnya melalui kolom WAX (30 m \times 0,25 μm \times 0,25 μm). Suhu oven secara bertahap meningkat mulai dari 40°C selama 3 menit,

kemudian dinaikkan dengan laju 10°C/menit hingga 100°C selama 2 menit, lalu dilanjutkan dengan laju 10°C/menit hingga 280°C selama 5 menit, untuk memastikan pemisahan senyawa dengan berbagai volatilitas dalam total waktu analisis 34 menit. Setelah melewati kolom, senyawa yang terelusi masuk ke detektor MS melalui transfer line yang diatur pada suhu 180°C, di mana ionisasi dilakukan dengan energi 70 eV. Detektor MS dioperasikan pada suhu sumber ion 230°C dan suhu quadropole 150°C. Akuisisi data dilakukan dalam mode *full scan* dengan rentang massa m/z 20–500. Identifikasi senyawa dilakukan dengan pencocokan spektrum massa terhadap *database* NIST 17.

3.3.6 Analisis data

Data hasil GC-MS dianalisis dengan menghitung *fold change* untuk membandingkan tingkat kemelimpahan profil metabolit sekunder jamur *Xylaria* sp. *wild type* dan *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol. *Fold change* dihitung menggunakan rumus (Salvatore *et al.*, 2024):

$$FC = \frac{\% \text{ Area teradaptasi}}{\% \text{ Area wild type}}$$

Keterangan:

FC = *Fold change*

% Area teradaptasi = luas area senyawa metabolit sekunder *Xylaria* sp. teradaptasi (%),

% Area *Wild type* = luas area senyawa metabolit sekunder *Xylaria* sp. *wild type* (%),

FC > 1 = metabolit dianggap meningkat (*upregulated*), dan

FC < 1 = metabolit dianggap menurun (*downregulated*).

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Simpulan yang diperoleh berdasarkan penelitian ini yaitu profil metabolit *Xylaria* sp. *wild type* dan *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol menunjukkan jenis metabolit sekunder yang sebagian besar sama, namun berbeda secara kuantitatif dan kualitatif. Beberapa metabolit sekunder mengalami peningkatan pada teradaptasi, sedangkan sebagian lainnya menurun atau hanya muncul pada salah satu isolat, yang menunjukkan adanya perubahan profil metabolit sekunder sebagai respons terhadap tekanan fungisida flutriafol.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian ini, disarankan dilakukan penelitian lanjutan dengan menambahkan tahapan derivatisasi pada proses ekstraksi sampel sebelum analisis profil metabolit jamur *Xylaria* sp. *wild type* dan *Xylaria* sp. teradaptasi fungisida flutriafol menggunakan GC-MS agar senyawa sterol, khususnya ergosterol sebagai target fungisida DMI, dapat terdeteksi dengan lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Adejor, J., Tumukunde, E., Li, G., Shehu, T. A., Wu, L., Jiang, Z., & Wang, S. 2025. Stepping out of the dark: how metabolomics shed light on fungal biology. *FEMS Microbiology Reviews*, 49: 1-16.
- Alves, V., Zamith-Miranda, D., Frases, S., & Nosanchuk, J. D. 2025. Fungal metabolomics: a comprehensive approach to understanding pathogenesis in humans and identifying potential therapeutics. *Journal of Fungi*, 11: 1-26.
- Ariyanti, M., Farida, F., & Umiyati, U. 2024. Review: Metabolit Sekunder pada Kelapa Sawit. *Paspalum: Jurnal Ilmiah Pertanian*, 12 (1): 207–215.
- Ask, M., Bettiga, M., Mapelli, V., & Olsson, L. 2013. The influence of HMF and furfural on redox-balance and energy-state of xylose-utilizing *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology for Biofuels*, 6 (22): 1-13.
- Bhavana, B. K., Mudliar, S. N., Bokade, V. V., & Debnath, S. 2022. Effect of furfural, acetic acid and 5-hydroxymethylfurfural on yeast growth and xylitol fermentation using *Pichia stipitis* NCIM 3497. *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Cao, M., Cheng, Q., Cai, B., Chen, Y., Wei, Y., Qi, D., Li, Y., Yan, L., Li, X., Long, W., Liu, Q., Xie, J., & Wang, W. 2022. Antifungal mechanism of metabolites from newly isolated *Streptomyces* sp. Y1-14 against banana Fusarium wilt disease using metabolomics. *Journal of Fungi*, 8 (1291): 1-16.
- Cevallos-Cevallos, J., García-Torres, R., Etxeberria, E., & ReyesDe-Corcuera, J. I. 2011. GC-MS analysis of headspace and liquid extracts for metabolomic differentiation of citrus huanglongbing and zinc deficiency in leaves of BValencia sweet orange from commercial groves. *Phytochemical analysis : PCA*, 22 (3): 236–246.
- Chen, S., Liu, Z., Chang, Z., Zheng, Y., Wang, X., Li, N., Huang, Z., Zhang, C., & Liu, X. 2025. Exploring Fungicide Sensitivity in Soybean Stem Blight Pathogen *Diaporthe longicolla*, Emphasizing Genetic Variability Impact on Response to SDHI Fungicides Fluopyram and Pydiflumetofen. *Journal of Fungi*, 11 (4): 1–14.
- Cuan, R., Liu, S., Zhou, C., Wang, S., Zheng, Y., & Yuan, Y. 2024. Transcriptome Analysis of mfs2-Defective *Penicillium digitatum* Teradaptasit to Reveal Importance of Pdmfs2 in Developing Fungal Prochloraz Resistance. *Microorganisms*, 12 (5).

- Delvian, Suryanto, D., & Sudirman. 2021. Pengaruh Fungisida Asam Fosfit dan Metalaksil Terhadap Perkecambahan dan Kolonisasi Spora *Gigaspora margarita* dan *Acaulospora tuberculata*. *Prosiding Seminar Nasional Mikoriza*, 1 (1): 43–52.
- Druseikis, M., Mottola, A., & Berman, J. 2023. The metabolism of susceptibility: clearing the FoG between tolerance and resistance in *Candida albicans*. *Current Clinical Microbiology Reports*, 10 (2): 36–46.
- Du, Y., Shi, N., Ruan, H., Miao, J., Yan, H., Shi, C., Chen, F., & Liu, X. 2021. Analysis of the prochloraz-Mn resistance risk and its molecular basis in *Mycogone rosea* from *Agaricus bisporus*. *Pest Management Science*, 77 (10): 4680–4690.
- Dutra, P. S. S., Lichtemberg, P. S. F., Martinez, M. B., Michailides, T. J., & De Mio, L. L. M. 2020. Cross-resistance among demethylation inhibitor fungicides with brazilian monilinia fructicola isolates as a foundation to discuss brown rot control in stone fruit. *Plant Disease*, 104 (11): 2843–2850.
- Fatma, M., Chatri, M., Fifendy, M., & Handayani, D. (2021). Effect of Papaya Leaf Extract (*Carica papaya* L.) on Colony Diameter and Percentage of Growth Inhibition of *Fusarium oxysporum* Pengaruh Ekstrak Daun Pepaya (*Carica papaya* L.) terhadap *Fusarium oxysporum*. *Serambi Biologi*, 6 (2): 9–14.
- FRAC. 2024. *FRAC Code List©* 2024: Fungal control agents sorted by cross-resistance pattern and mode of action (including coding for FRAC Groups on product labels)*. <https://www.frac.info/fungicide-resistance-management/>. Diakses pada 1 Juni 2025.
- Jaelani, T., Yamin, M., & Mahandari, C. P. 2022. Machine Learning untuk Prediksi Produksi Gula Nasional. *JMPM (Jurnal Material Dan Proses Manufaktur)*, 6 (1): 31-36.
- Jilani, S. B., & Olson, D. G. 2023. Mechanism of furfural toxicity and metabolic strategies to engineer tolerance in microbial strains. *Microbial Cell Factories*, 22 (221): 1-20.
- Junaidi, Y., Partiwiningrum, A., Erwanto, Y., Mira Yusiati, L., Hayakawa, T., Nakagawa, T., & Agus Fitriyanto, N. 2018. Purification By Ion Exchange Chromatography and Enzyme Characterization of Potential De-Hairing Alkaline Protease From *Bacillus cereus* Ls2B. *J. Biotechnol*, 15(2): 413–421.
- Kementerian Pertanian. 2024. *STATISTIK PERKEBUNAN 2023-2025. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Sekretariat Jenderal - Kementerian Pertanian 2023*. 1–1080.
- Khatami, K., Qazanfarzadeh, Z., & Jiménez-Quero, A. 2026. Fungal fermentation: the blueprint for transforming industrial side streams and residues. *Bioresource Technology*, 440: 1-40.

- Korpioja, M.-E., Sveholm, E., Dilokpimol, A., Paasela, T., & Kovalchuk, A. 2025. Transcriptome analysis of *Aspergillus oryzae* RIB40 under chemical stress reveals mechanisms of adaptation to fungistatic compounds of lignocellulosic side streams. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 18 (89): 1-17.
- Kustiyo, A., Mukhlis, M., & Suharso, A. 2022. Model Recurrent Neural Network untuk Peramalan Produksi Tebu Nasional. *Bina Insani Ict Journal*, 9 (1): 1-10.
- Li, F. J., Ebihara, A., Sakahara, Y., Matsumoto, S., Ueno, R., Bao, W. X., Kimura, M., Fuji, S. ichi, Shimizu, M., Kageyama, K., & Suga, H. 2023. Synergistic effect of amino acid substitutions in CYP51B for prochloraz resistance in *Fusarium fujikuroi*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 189.
- Li, G., Jian, T., Liu, X., Lv, Q., Zhang, G., & Ling, J. 2022. Application of metabolomics in fungal research. *Molecules*, 27: 1-25.
- Li, L., Liao, Z. Bin, Yang, Y., Lv, L., Cao, Y. Y., & Zhu, Z. Y. 2018. Metabolomic profiling for the identification of potential biomarkers involved in a laboratory azole resistance in *Candida albicans*. *PLoS ONE*, 13 (2): 1–17.
- Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M. R., & Wu, H. 2020. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148: 80–89.
- Liu, Y., & Kerton, F. M. 2021. Mechanistic studies on the formation of 5-hydroxymethylfurfural from the sugars fructose and glucose. *Pure and Applied Chemistry*, 93 (4): 463–478.
- Maridueña-Zavala, M. G., Chong-Aguirre, P. A., Freire-Peñaherrera, A., Moreno, A., Reyes-De-Corcuera, J. I., Jiménez-Feijoo, M. I., & Cevallos-Cevallos, J. M. 2024. GC-MS metabolite profiling of *Pseudocercospora fijiensis* isolates resistant to thiabendazole. *PLoS ONE*, 19: 1–18.
- Maridueña-Zavala, M. G., Freire-Peñaherrera, A., Cevallos-Cevallos, J. M., & Peralta, E. L. 2017. GC-MS metabolite profiling of *Phytophthora infestans* resistant to metalaxyl. *European Journal of Plant Pathology*, 149 (3): 563–574.
- Maryono, T., Widiastuti, A., & Priyatmojo, A. 2017. Penyakit Busuk Akar dan Pangkal Batang Tebu di Sumatera Selatan. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 13 (2): 67–71.
- Maryono, T., Widiastuti, A., Murti, R. H., & Priyatmojo, A. 2019. Identification and Characterization of the Causal Agent of Sugarcane Root and Basal Stem Rot in South Sumatra, Indonesia. *Sugar Tech*, 22 (1): 1–7.
- Maryono, T., Widiastuti, A., Murti, R. H., & Priyatmojo, A. 2020. Komponen epidemi penyakit busuk akar dan pangkal batang tebu di Sumatera Selatan. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 16 (2): 49–60.
- Menko Perekonomian. 2010. Keputusan Menteri Koordinator Bidang Perekonomian No. Kep-28/M.EKON/05/2010 tentang Tim Koordinasi Stabilisasi Pangan Pokok. <http://www.setneg.go.id/>

- Mossion, A., Ourliac-Garnier, I., & Wielgosz-Collin, G. 2023. Fungal sterol analyses by gas chromatography–mass spectrometry using different derivatives. In: *Microbial Steroids: Methods and Protocols*, 8: 1-14.
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). 2026. *Xylaria*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/wwwtax.cgi?id=364228>. Diakses pada 5 Maret 2026.
- Panchal, P., Miller, A. J., & Giri, J. 2021. Organic acids: versatile stress-response roles in plants. *Journal of Experimental Botany*. 1-15.
- Rachmawan, A., & Dalimunthe, C. I. 2017. Prospek Pemanfaatan Metabolit Sekunder Tumbuhan Sebagai Pestisida Nabati Untuk Pengendalian Patogen Pada Tanaman Karet. *Warta Perkaratan*, 36 (1): 15–28.
- Rathnayaka, A. R., Chethana, K. W. T., Manowong, A., Bhagya, A. T., Win, H., Tun, Z. L., Mapook, A., Hyde, K. D. 2025. Taxonomy, phylogeny, and bioactive potential of *Xylariales* (Sordariomycetes, Ascomycota) from Thailand: novel species discovery, new host and geographical records, and antibacterial properties. *MycoKeys*, 120: 35–117.
- Roman, D.-L., Matica, M. A., Boros, B.-V., Vulpe, C.-B., & Isvoran, A. 2024. Evaluation of the Impact of Flutriafol on Soil Culturable Microorganisms and on Soil Enzymes Activity. *Agriculture*, 14 (1445): 1–21.
- Salvatore, M. M., Maione, A., Imperato, M., Salvatore, F., Guida, M., Galdiero, E., & Andolfi, A. 2024. A metabolomics footprinting approach using GC-MS to study inhibitory effects of the fungal metabolite diplopyrone C against nosocomial pathogen biofilms. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 243: 1-13.
- Seyrig, C., Le Griel, P., Cowieson, N., Perez, J., & Baccile, N. 2020. Synthesis of multilamellar walls vesicles polyelectrolyte-surfactant complexes from pH-stimulated phase transition using microbial biosurfactants. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1-31.
- Soepandi, H., Watunglawar, B., & Suprpto, D. 2024. Implementasi Aplikasi “TEBU LINK” sebagai Upaya untuk Meningkatkan Produktifitas Petani Tebu dan Pabrik Gula Situbondo Jawa Timur. *Jurnal Abdi Masyarakat Indonesia (JAMSI)*, 4 (3): 701–706.
- Sumardiyono, C. 2008. Ketahanan Jamur terhadap Fungisida di Indonesia. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*, 14 (1): 1–5.
- Sun, Y., Jin, B., Yang, J., Liu, B., Li, T., Zhang, X., Chen, X., & Chen, Y. 2024. Risk assessment of resistance to prochloraz in *Phoma arachidicola* causing peanut web blotch. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 203: 1-11.
- Tanwar, S., Kalra, S., & Bari, V. K. 2024. Insights into the role of sterol metabolism in antifungal drug resistance: a mini-review. *Frontiers in Microbiology*, 15: 1-12.
- Widowati, R., Winarno, Sulaksana, C., & Guntur, D. 2022. Sebaran Serangan Penyakit Busuk Akar dan Pangkal Batang di wilayah PG Cintamanis. *Indonesian Sugar Research Journal*, 2 (1): 1–11.

- Wu, Z., Zhang, Y., Liu, X., & Chen, F. 2024. Utilizing metabolomic approach to study the mode of action and resistance mechanisms of fungicides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 201: 197-205.
- Yin, Y., Miao, J., Shao, W., Liu, X., Zhao, Y., & Ma, Z. 2023. Fungicide Resistance: Progress in Understanding Mechanism, Monitoring, and Management. *Phytopathology*, 113 (4): 707–718.
- Yu, P., Jia, C., Song, W., & Liu, F. 2012. Dissipation and residues of flutriafol in wheat and soil under field conditions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 89 (5): 1040–1045.
- Yogendra, K.N., Kumar, A., Sarkar, K., Li, Y., Pushpa, D., Mosa, K.A., Duggavathi, R. & Kushalappa, A.C., 2015. Transcription factor StWRKY1 regulates phenylpropanoid metabolites conferring late blight resistance in potato. *Journal of experimental botany*, 66 (22): 7377-7389.
- Zhang, Y., Zhang, B., Luo, C., Fu, Y., & Zhu, F. 2021. Fungicidal Actions and Resistance Mechanisms of Prochloraz to *Penicillium digitatum*. *Plant Disease*, 105 (2): 408–415.