

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kopi robusta (*Coffea canephora*) merupakan salah satu komoditas perkebunan yang memiliki peran strategis dalam perekonomian Indonesia. Sebagai produsen kopi robusta terbesar keempat di dunia dengan produksi mencapai 774. 600 ton pada tahun 2023, Indonesia memiliki tanggung jawab besar untuk menjamin mutu dan keamanan produk kopinya (Wibowo *et al.*, 2022) Lebih dari 1,9 juta petani menggantungkan mata pencaharian mereka dari budidaya kopi, sehingga keberlangsungan industri ini tidak hanya berdampak pada ekonomi, tetapi juga pada kesejahteraan masyarakat luas (Hasan *et al.*, 2019). Namun, keunggulan produksi tersebut harus diimbangi dengan jaminan keamanan pangan, terutama terkait potensi kontaminasi mikotoksin yang dapat muncul selama proses pascapanen dan penyimpanan.

Karakteristik budidaya kopi robusta yang umumnya dilakukan di dataran rendah dengan suhu relatif tinggi dan kelembapan besar membedakannya dari kopi arabika yang tumbuh di dataran tinggi. Kondisi lingkungan tersebut secara teoritis dapat mendukung pertumbuhan berbagai jenis kapang, termasuk yang berpotensi menghasilkan mikotoksin seperti *Aspergillus* spp. dan *Penicillium* spp. (Adhikari *et al.*, 2020). Suhu yang lebih hangat dan kelembapan yang tinggi di daerah budidaya robusta dapat mempercepat proses kolonisasi jamur, khususnya ketika praktik pascapanen tidak dilakukan secara optimal. Beberapa penelitian melaporkan bahwa faktor

ketinggian tempat dan kelembapan udara memiliki korelasi dengan keberadaan jamur pada biji kopi (Hagos *et al.*, 2024).

Praktik pascapanen di tingkat petani kopi Indonesia sangat bervariasi dan tidak selalu mengikuti standar prosedur yang ideal. Berdasarkan observasi lapangan, masih banyak petani yang melakukan pengeringan pada permukaan tanah atau menggunakan terpal yang kurang bersih. Proses pengeringan yang tidak sempurna dapat mengakibatkan kandungan air biji melebihi 12% saat penyimpanan, yang mana kondisi tersebut sangat mendukung pertumbuhan kapang (Suarez-Quiroz *et al.*, 2020). Di sisi lain, perubahan pola iklim global juga turut memperluas wilayah yang berpotensi mendukung pertumbuhan jamur penghasil toksin. Proyeksi dari beberapa model iklim mengindikasikan bahwa tanpa penerapan praktik mitigasi yang tepat, risiko kontaminasi mikotoksin pada kopi dapat meningkat signifikan di masa mendatang (Battilani *et al.*, 2016).

Kontaminasi kapang pada biji kopi pascapanen telah menjadi perhatian dalam berbagai literatur ilmiah. Genus kapang yang sering ditemukan pada biji kopi antara lain *Aspergillus*, *Penicillium*, dan *Fusarium* (Charuhirunroch *et al.*, 2025). Keberadaan kapang ini penting untuk dipantau karena beberapa spesies dari genus tersebut diketahui memiliki kemampuan menghasilkan mikotoksin berbahaya. Aflatoksin, yang dihasilkan terutama oleh *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus parasiticus*, merupakan salah satu kontaminan yang paling dikhawatirkan dalam produk pangan (Alameri *et al.*, 2023). Studi di berbagai negara produsen kopi menunjukkan bahwa sampel kopi robusta dapat

mengandung aflatoksin, dengan proporsi yang bervariasi tergantung pada kondisi pascapanen dan penyimpanan (Wanita *et al.*, 2024).

Aflatoksin merupakan kelompok mikotoksin dengan toksisitas tinggi yang terdiri dari beberapa jenis, di antaranya AFB₁, AFB₂, AFG₁, dan AFG₂ (Battilani *et al.*, 2016). Di antara jenis-jenis tersebut, AFB₁ dikenal sebagai yang paling berbahaya karena bersifat karsinogenik. Senyawa ini dapat dimetabolisme oleh enzim sitokrom P450 di dalam tubuh menjadi bentuk epoksida yang reaktif, yang kemudian dapat berikatan dengan DNA dan meningkatkan risiko kanker hati (Wu *et al.*, 2019). Penelitian epidemiologis menunjukkan bahwa paparan kronis terhadap AFB₁, bahkan dalam dosis rendah, dapat meningkatkan insiden hepatocellular carcinoma hingga 4-5 kali lipat, terutama pada populasi dengan prevalensi hepatitis B yang tinggi seperti di kawasan Asia Tenggara (Chen *et al.*, 2026). Selain dampak karsinogenik, aflatoksin juga dapat menurunkan fungsi sistem kekebalan tubuh dengan cara menekan aktivitas sel-sel fagosit dan respons imun adaptif (Ma *et al.*, 2021).

Meskipun risiko kesehatan dari aflatoksin sudah sangat jelas, tidak semua kondisi pascapanen akan menghasilkan kontaminasi yang signifikan. Keberadaan kapang pada biji kopi tidak secara otomatis berarti terdapat aflatoksin, karena produksi mikotoksin sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk spesies kapang, strain tertentu, serta kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan ketersediaan nutrisi (de Souza *et al.*, 2021). Oleh karena itu, pemeriksaan langsung terhadap kandungan aflatoksin dalam sampel kopi

menjadi sangat penting untuk mendapatkan gambaran yang akurat mengenai status keamanan produk.

Dengan semakin meningkatnya konsumsi kopi di Indonesia dan tingginya volume ekspor ke pasar internasional, keamanan produk kopi dari aspek mikotoksin menjadi isu yang tidak bisa diabaikan. *European Food Safety Authority* (EFSA) menegaskan bahwa aflatoksin tetap menjadi salah satu kontaminan pangan yang paling signifikan secara global karena tingkat prevalensinya pada berbagai komoditas termasuk kopi (Panel *et al.*, 2020). Regulasi internasional terkait batas maksimum aflatoksin dalam produk pangan juga terus diperketat. Mulai tahun 2024, Uni Eropa telah mengimplementasikan EU Regulation 2023/915 yang menurunkan batas maksimum aflatoksin B₁ dalam kopi dari 8 µg/kg menjadi 5 µg/kg (EU, 2023). Pengetatan standar ini menuntut produsen kopi untuk lebih ketat dalam mengendalikan kualitas pascapanen agar tetap dapat bersaing di pasar internasional.

Salah satu aspek yang menarik untuk dikaji adalah perbedaan metode pascapanen dan pengaruhnya terhadap profil mikrobiologis serta keamanan biji kopi. Metode natural, yang dilakukan dengan mengeringkan buah kopi secara utuh tanpa melalui proses pengupasan kulit terlebih dahulu, memiliki waktu pengeringan yang relatif lebih lama (Sandeep *et al.*, 2021). Proses ini dapat mempertahankan kelembapan tinggi pada biji jika tidak dikelola dengan baik, yang secara teoritis dapat memberikan kondisi yang mendukung bagi pertumbuhan kapang (Elhalis *et al.*, 2023). Namun, jika pengeringan dilakukan

secara optimal dengan kontrol yang baik, risiko tersebut dapat diminimalkan. Di sisi lain, metode *wine fermentation* merupakan pendekatan yang relatif baru dan sedang berkembang dalam industri kopi *specialty*. Metode ini melibatkan proses fermentasi yang lebih panjang, biasanya antara 48 hingga 96 jam, dengan tujuan untuk menghasilkan profil rasa yang unik dan kompleks (Silva *et al.*, 2024). Kopi yang dihasilkan dari metode ini memiliki nilai jual yang jauh lebih tinggi, bahkan dapat mencapai 3-5 kali lipat dari kopi yang diproses dengan metode konvensional (Pereira *et al.*, 2020). Fermentasi yang terkontrol dapat menciptakan lingkungan dengan pH rendah yang berpotensi menghambat pertumbuhan kapang tertentu. Namun, jika proses fermentasi tidak dikelola dengan baik, kondisi anaerob yang berkepanjangan juga dapat membuka peluang bagi pertumbuhan mikroorganisme yang tidak diinginkan (Braga *et al.*, 2023).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa fermentasi anaerobik yang tidak terkontrol dapat meningkatkan risiko kontaminasi kapang toksigenik (Lee *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2021). Kombinasi antara kelembapan tinggi, durasi fermentasi yang panjang, dan kondisi lingkungan yang kurang steril dapat memperbesar kemungkinan munculnya kontaminasi mikrobiologis (Rubio-Lopez *et al.*, 2023). Namun, sejauh ini belum banyak data yang mengonfirmasi apakah metode *wine fermentation* yang diterapkan di Indonesia benar-benar menghasilkan kontaminasi aflatoxin yang signifikan atau justru aman dari kontaminasi tersebut.

Dengan semakin banyaknya petani dan pengolah kopi yang tertarik menerapkan metode *wine fermentation* tanpa panduan yang jelas terkait aspek keamanan pangan, maka penelitian mengenai profil kontaminasi mikotoksin pada metode ini menjadi sangat relevan. Popularitas metode ini yang terus meningkat di kalangan produsen *specialty coffee* tidak diimbangi dengan ketersediaan literatur ilmiah yang memadai mengenai risiko mikotoksin. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada metode natural dan *washed*, sementara *wine fermentation* sebagai metode inovatif belum banyak dieksplorasi dari sisi keamanan pangan (Ferreira *et al.*, 2023).

Selain deteksi aflatoksin, isolasi dan karakterisasi morfologis kapang yang tumbuh pada biji kopi juga penting dilakukan. *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus parasiticus* merupakan spesies yang paling sering dilaporkan sebagai penghasil aflatoksin pada biji kopi pascapanen (Zakaria, 2024). Namun, tidak semua isolat kapang yang ditemukan pada biji kopi memiliki kemampuan menghasilkan toksin, karena hal tersebut sangat bergantung pada karakteristik strain dan kondisi lingkungannya (de Souza *et al.*, 2021). Dengan melakukan isolasi dan karakterisasi morfologis, dapat diperoleh gambaran mengenai jenis-jenis kapang yang dominan pada masing-masing metode pascapanen, meskipun keberadaan kapang tersebut tidak selalu berkorelasi langsung dengan keberadaan aflatoksin.

Penelitian ini memiliki beberapa aspek kebaruan yang membedakannya dari penelitian-penelitian sebelumnya. Pertama, penelitian yang membahas profil kontaminasi aflatoksin pada kopi robusta dengan membandingkan

metode pascapanen natural dan *wine fermentation* masih sangat terbatas, khususnya pada konteks produksi kopi di Indonesia. Kedua metode tersebut memiliki perbedaan mendasar dalam proses mikrobiologisnya, namun belum pernah dikaji secara langsung dalam konteks keamanan mikotoksin di Indonesia. Sebagian besar literatur yang ada berfokus pada metode konvensional seperti natural dan washed, sementara metode *wine fermentation* yang kini berkembang pesat belum memiliki dokumentasi ilmiah yang cukup mengenai profil risikonya terhadap aflatoksin.

Kedua, pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini bersifat integratif, yaitu menggabungkan deteksi aflatoksin dengan isolasi dan karakterisasi morfologis kapang *Aspergillus* spp. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara beban kapang dengan potensi kontaminan toksin. Banyak penelitian terdahulu hanya melaporkan kadar aflatoksin tanpa mengidentifikasi sumber kontaminan secara mikrobiologis (Caporaso *et al.*, 2022). Dengan mengintegrasikan kedua aspek tersebut, penelitian ini dapat memberikan informasi yang lebih lengkap dan dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan strategi pengendalian yang lebih tepat.

Ketiga, penelitian ini diharapkan dapat memberikan data awal mengenai potensi kontaminasi mikotoksin pada kedua metode pascapanen tersebut. Sebagian besar literatur global didominasi oleh studi yang dilakukan pada kopi arabika dari wilayah Afrika dan Amerika Latin (Adetunji *et al.*, 2022; Taniwaki *et al.*, 2014). Kopi robusta memiliki karakteristik budidaya dan

pascapanen yang berbeda dari arabika, sehingga data yang spesifik untuk robusta Indonesia sangat diperlukan untuk mendukung kebijakan dan praktik di lapangan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi faktual mengenai status keamanan biji kopi robusta yang diproses dengan metode natural dan *wine fermentation*. Apabila hasil menunjukkan tidak terdeteksinya aflatoksin pada sampel yang diuji, maka temuan tersebut dapat menjadi indikator positif bahwa kedua metode pascapanen, jika dilakukan dengan pengendalian yang baik, dapat menghasilkan produk yang aman dari kontaminasi aflatoksin. Data ini akan sangat berharga sebagai bahan edukasi bagi petani dan pelaku industri kopi bahwa penerapan praktik pascapanen yang tepat dapat meminimalkan risiko kontaminasi, meskipun kondisi lingkungan budidaya robusta secara teoritis mendukung pertumbuhan kapang.

Selain itu, informasi mengenai jenis-jenis kapang yang diisolasi dari biji kopi pascapanen dapat menjadi dasar untuk memahami dinamika mikrobiologis yang terjadi selama proses pascapanen dan penyimpanan. Meskipun keberadaan kapang tidak selalu mengindikasikan adanya aflatoksin, identifikasi spesies kapang yang dominan tetap penting untuk keperluan monitoring dan pengembangan strategi pencegahan kontaminasi di masa depan. Data tersebut juga dapat menjadi referensi untuk penelitian lanjutan yang lebih mendalam, misalnya terkait kondisi spesifik yang dapat memicu produksi aflatoksin oleh kapang yang ditemukan.

1.2 Rumusan Masalah

- 1.2.1 Apakah terdapat kapang dari genus *Aspergillus* pada biji kopi robusta (*Coffea canephora*) yang diproses dengan metode pascapanen natural dan *wine fermentation* tersebut?
- 1.2.2 Bagaimana karakteristik morfologi kapang yang diisolasi dari biji kopi robusta (*Coffea canephora*) yang diproses dengan metode pascapanen natural dan *wine fermentation*?
- 1.2.3 Apakah terdapat kontaminasi aflatoksin pada biji kopi robusta (*Coffea canephora*) yang diproses dengan metode pascapanen natural dan *wine fermentation*?

1.3 Tujuan Penelitian

- 1.3.1 Mengisolasi dan melakukan karakterisasi morfologis kapang *Aspergillus* spp. pada biji kopi robusta (*Coffea canephora*) hasil pascapanen natural dan *wine fermentation*.
- 1.3.2 Menganalisis kadar aflatoksin pada biji kopi robusta (*Coffea canephora*) hasil proses pascapanen natural dan *wine fermentation*.

1.4 Manfaat Penelitian

- 1.4.1 Memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang bioteknologi pangan, khususnya terkait deteksi kontaminan mikotoksin menggunakan metode LC–MS serta identifikasi kapang *Aspergillus* spp..

- 1.4.2 Menyediakan informasi bagi petani, pengumpul, dan pelaku industri kopi mengenai risiko kontaminasi aflatoksin serta pentingnya penerapan pengelolaan pascapanen dan penyimpanan yang tepat.
- 1.4.3 Mendukung upaya peningkatan keamanan pangan melalui pemahaman mengenai bahaya aflatoksin, sehingga dapat membantu meminimalkan risiko kesehatan masyarakat akibat konsumsi kopi yang terkontaminasi.

2.4 Aflatoksin

Aflatoksin adalah kelompok mikotoksin karsinogenik yang merupakan metabolit sekunder jamur *Aspergillus*, terutama *A. flavus* dan *A. parasiticus*, yang banyak mencemari pangan dan pakan di daerah beriklim hangat-lembap (Rushing & Selim, 2019). Secara kimia, aflatoksin memiliki kerangka dasar difuranokumarin (difuranocoumarin backbone) yang bertanggung jawab terhadap sifat toksik dan banyak aktivitas biologisnya (Gemedede, 2025). Struktur aflatoksin bersifat polisiklik, tersusun dari inti kumarin yang terikat pada sistem bifurano, dengan seri B (misalnya AFB₁) terhubung ke cincin pentanon dan seri G (misalnya AFG₁) ke cincin lakton enam anggota; dalam tinjauan struktur biasanya ditampilkan sebagai gambar kerangka difurokumarin siklopentanon dan difurokumarin lakton (Abrehame *et al.*, 2023). Aflatoksin menghasilkan fluoresensi kuat ketika disinari UV 365nm, dimana AFB₁ dan AFB₂ memancarkan cahaya biru, sedangkan AFG₁ dan AFG₂ hijau kekuningan, sehingga digunakan sebagai dasar penamaan seri B dan G serta metode deteksi fluoresensi (Nazhand *et al.*, 2020). Sumber fluoresensi ini berhubungan dengan cincin difuran dan inti kumarin yang menyerap radiasi UV kemudian melepaskan energi sebagai cahaya tampak pada panjang gelombang spesifik, sehingga struktur aromatik terkonjugasi difurokumarin menjadi kunci sifat berpendar aflatoksin (Nazhand *et al.*, 2020).