

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia dikenal sebagai negara agraris dengan kekayaan alam yang luar biasa. Indonesia didukung dengan letak geografis dan iklim tropis sehingga memberikan keuntungan besar bagi sektor pertanian dan perkebunan untuk tumbuh dan berkembang secara optimal. Salah satu komoditas unggulan yang menjadi tulang punggung perekonomian Indonesia adalah kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). Komoditas ini menghasilkan *Crude Palm Oil* (CPO), yaitu minyak nabati yang sangat diminati secara global, baik untuk kebutuhan pangan, kosmetik, maupun bahan bakar alternatif. Indonesia merupakan produsen dan pengekspor minyak sawit terbesar di dunia, dengan wilayah utama pengembangan perkebunan tersebar di Pulau Kalimantan, Sumatera, Sulawesi, dan Papua. Produksi minyak sawit tersebut berasal dari pengolahan tandan buah segar (TBS) kelapa sawit, yang tersusun atas sejumlah brondolan (buah tunggal) yang melekat pada satu tandan. Proses pertumbuhan dan pematangan dari brondolan kelapa sawit menjadi aspek penting, karena tahapan ini dipengaruhi oleh aktivitas metabolisme yang menyebabkan perubahan berbagai jenis metabolit di dalam jaringan brondolan kelapa sawit.

Secara umum, metabolit merupakan molekul kecil perantara reaksi metabolisme dalam sel, termasuk metabolit primer seperti karbohidrat, protein, dan lemak yang terlibat langsung dalam metabolisme dasar tanaman serta metabolit sekunder yang lebih mencerminkan respons tanaman terhadap kondisi fisiologis tertentu (Ariyanti *et al.*, 2024). Profil metabolit primer dan sekunder yang terdeteksi selama perkembangan brondolan kelapa sawit mencerminkan perubahan jalur metabolik utama yang berlangsung di jaringan mesokarp. Aktivitas jalur biosintesis ini dapat memicu perubahan biokimia yang ditandai dengan variasi komposisi dan konsentrasi senyawa metabolit, termasuk senyawa fenolik, flavonoid, dan antosianin. Perubahan tersebut tidak hanya

menggambarkan kondisi fisiologis organ brondolan, tapi juga dapat digunakan sebagai indikator tingkat kematangan (Teh *et al.*, 2013).

Tingkat kematangan brondolan kelapa sawit berpengaruh langsung terhadap kualitas dan kuantitas minyak yang dihasilkan. Brondolan yang dipanen sebelum mencapai kematangan fisiologis optimal cenderung memiliki aktivitas metabolik yang belum maksimal untuk biosintesis lipid, sehingga menghasilkan rendemen minyak yang rendah. Sebaliknya, brondolan yang terlalu matang mengalami perubahan metabolit yang mengarah pada degradasi lipid, ditandai dengan meningkatnya kadar *Free Fatty Acid* (FFA) yang menurunkan mutu minyak sawit mentah (Susanti & Lestari, 2021). Secara biologis, perbedaan tingkat kematangan tersebut berkaitan erat dengan perubahan metabolisme internal brondolan. Perkembangan brondol kelapa sawit berdasarkan hari setelah penyerbukan (HSP) mencerminkan fase fisiologis mesokarp yang berbeda, di mana terjadi perubahan signifikan pada profil metabolit. Perubahan metabolit ini menandai pergeseran aktivitas metabolik dari fase pertumbuhan awal menuju fase akumulasi lipid pada tahap kematangan menengah hingga akhir, sehingga menunjukkan bahwa tingkat kematangan brondol kelapa sawit berhubungan langsung dengan dinamika metabolit yang mendasari pembentukan dan kualitas CPO (Neoh *et al.*, 2013).

Profil metabolit sekunder pada brondolan kelapa sawit terdiri atas berbagai senyawa dengan karakteristik yang beragam dan saling berinteraksi, sehingga menghasilkan data yang bersifat multidimensi. Variasi kandungan metabolit pada setiap tingkat kematangan menyebabkan pola data menjadi kompleks dan sulit diinterpretasikan hanya dengan analisis univariat. Karakteristik kompleks yang ada pada metabolit brondolan ini memerlukan pengolahan data analisis multivariat (Prasetyo, 2021). Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *K-Means Clustering*, yaitu metode *unsupervised learning* yang mengelompokkan sampel ke dalam beberapa klaster berdasarkan tingkat kemiripan karakteristik profil metabolit. Melalui pengelompokan tersebut, hubungan antar

sampel serta kecenderungan pengelompokan berdasarkan tingkat kematangan dapat diidentifikasi sehingga memudahkan interpretasi karakteristik metabolit pada setiap kelompok sampel (Eicher *et al.*, 2020). *Heatmap* melalui *Hierarchical Clustering Analysis* (HCA) akan memvisualisasi pola hubungan antar variabel dan perbedaan karakteristik sampel berdasarkan tingkat kematangan brondolan kelapa sawit. *Heatmap* bekerja dengan merepresentasikan nilai intensitas setiap variabel dalam bentuk gradasi warna, sehingga memudahkan identifikasi pola, klaster, maupun perbedaan profil metabolit antar kelompok kematangan secara visual. Melalui *heatmap*, perubahan intensitas metabolit pada setiap sampel dapat diamati secara komparatif, baik antar variabel maupun antar tingkat kematangan brondolan kelapa sawit, tanpa memerlukan proses klasifikasi berbasis algoritma prediktif. Kombinasi K-Means dengan *heatmap* menjadikan pendekatan ini relevan untuk mendukung pengembangan identifikasi karakteristik dari metabolit kelapa sawit berdasarkan tingkat kematangan yang digunakan. Oleh karena itu, penulis tertarik mengangkat judul "**Identifikasi Karakteristik Metabolit Sekunder Brondolan Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) Berdasarkan Tingkat Kematangan Menggunakan Analisis Multivariat**".

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian yang dilakukan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik profil metabolit sekunder (fenolik, flavonoid, dan antosianin) pada brondolan kelapa sawit dengan 3 (tiga) tingkat kematangan berbeda (mentah, matang, dan lewat matang)?
2. Bagaimana pola hubungan dari metabolit sekunder brondolan kelapa sawit pada tingkat kematangan mentah, matang dan lewat matang?

3. Apakah terdapat perbedaan yang signifikan pada kadar metabolit sekunder (fenolik, flavonoid, dan antosianin) antar tingkat kematangan brondolan kelapa sawit?

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis pola pengelompokan brondolan kelapa sawit berdasarkan kandungan fenolik, flavonoid, dan antosianin pada tiga tingkat kematangan menggunakan *K-Means Clustering*.
2. Menganalisis pola distribusi dan kemiripan kandungan fenolik, flavonoid, dan antosianin pada brondolan kelapa sawit berdasarkan tingkat kematangan menggunakan *heatmap*.
3. Menganalisis perbedaan kadar metabolit sekunder (fenolik, flavonoid, dan antosianin) antar tingkat kematangan brondolan kelapa sawit menggunakan *Analysis of Variance (ANOVA)*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian yang dilakukan sebagai berikut:

1. Menghasilkan karakteristik metabolit sekunder yang dapat digunakan sebagai indikator tingkat kematangan dari brondolan kelapa sawit yang akan dipanen.
2. Memberikan pemahaman ilmiah mengenai pengaruh tingkat kematangan terhadap stabilitas metabolit sekunder, sehingga dapat membantu optimasi proses pengolahan agar kehilangan metabolit dapat diminimalkan.

1.5 Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini yaitu terdapat pengaruh variasi tingkat kematangan terhadap karakteristik metabolit sekunder brondolan kelapa sawit secara signifikan.