

BAB I PENDAHULUAN

1.1.Latar belakang

Bayam merah (*Amaranthus tricolor* L.) merupakan sayuran daun dari famili Amaranthaceae yang memiliki karakteristik berupa pigmentasi ungu kemerahan, yang berfungsi sebagai penanda visual keberadaan pigmen betalain (Lu et al., 2024; Sarker & Oba, 2020). Meskipun belum dimanfaatkan secara optimal, bayam merah diakui sebagai *superfood* karena profil nutrisinya, mulai dari nutrisi makro seperti protein yang kaya akan lisin dan metionin hingga nutrisi mikro seperti vitamin A, C, zat besi, dan kalsium yang melebihi kandungan pada sayuran hijau lainnya (Jahan et al., 2022; Sarker & Oba, 2020). Di Indonesia, bayam merah dikenal karena kemampuan adaptasinya terhadap kondisi iklim tropis yang ekstrem hingga potensinya untuk memperkuat diversifikasi pangan lokal dan program perbaikan gizi masyarakat (Anjarwati et al., 2023; Rahmawati et al., 2021). Selain itu, tingginya kandungan senyawa bioaktif meningkatkan potensi bayam merah sebagai komoditas bahan baku industri farmasi dan pewarna alami (Ariami & Jubair, 2019; Chang et al., 2021; Sarker & Oba, 2018a).

Metabolit sekunder dalam bayam merah, seperti betalain dan senyawa fenolik, merupakan molekul organik kompleks yang dihasilkan melalui jalur biosintesis spesifik, termasuk jalur asam sikimat (*shikimate pathway*) dan jalur betalain, yang berfungsi sebagai mekanisme pertahanan serta respons adaptif tanaman (Araujo-León et al., 2023; S. Liu et al., 2019). Keragaman struktur metabolit ini mengarah pada bioaktivitas yang cukup luas, diantaranya kapasitas antioksidan, antimikroba, dan anti-inflamasi (Chang et al., 2021; Kumar BS, 2025; Sarker & Oba, 2020). Senyawa bioaktif, seperti kuersetin, asam galat, dan amarantin, pada tanaman ini memiliki efek terapeutik sebagai antihiperglikemia, hepatoprotektif, dan terapi kardiovaskular melalui mekanisme penetralan spesies oksigen reaktif (Kumar BS, 2025; Sarker & Oba, 2019a). Selain itu, profil fitokimia bayam merah juga berkontribusi sebagai model studi isolasi senyawa murni dan modifikasi struktur untuk pengembangan prototipe obat baru (S. Liu et al., 2019; Roriz et al., 2021; Sarker & Oba, 2020). Oleh karena itu, eksplorasi metabolit sekunder pada bayam merah tidak hanya memperkuat

statusnya sebagai pangan fungsional, tetapi juga membuka peluang senyawa kimia alami dengan nilai tambah industri yang tinggi.

Namun, akumulasi metabolit sekunder bersifat fluktuatif karena dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tanam. Saat ini, sistem budidaya hidroponik semakin berkembang karena kemampuannya dalam mengendalikan nutrisi secara presisi, sehingga mendukung pertumbuhan biomassa yang optimal dan seragam (Lestari et al., 2024). Akan tetapi, lingkungan akuatik yang lebih terkendali memiliki tingkat cekaman abiotik maupun biotik yang lebih rendah. Sebaliknya, metode budidaya konvensional berbasis tanah memaparkan tanaman pada lingkungan yang heterogen—seperti fluktuasi ketersediaan air, variasi suhu, dan interaksi dengan mikroorganisme tanah. Pada kondisi tertentu, fluktuasi lingkungan dapat memicu sistem persinyalan *reactive oxygen species* (ROS) untuk mengalokasikan energi menuju biosintesis senyawa pertahanan, seperti asam fenolat dan flavonoid (Rao et al., 2025; Sun et al., 2023). Studi pemrofilan metabolit pada daun ubi jalar yang dibudidayakan di tanah dan secara hidroponik berhasil mengidentifikasi 71 metabolit terkait kualitas rasa serta menunjukkan perbedaan kadar vitamin C, flavon, dan nitrat antarsistem budidaya (Lin et al., 2021). Pada selada, 101 senyawa berkontribusi terhadap karakter nutrisi dan rasa. Tetrakosanol, heksakosanol, laktukopikrin-15-oksalat, dan 15-deoksilaktusin-8-sulfat diusulkan sebagai biomarker. Selada hidroponik cenderung lebih kaya asam amino, sedangkan selada tanah mengandung lebih banyak alkohol turunan asam lemak dan lakton seskuiterpen spesifik (Tamura et al., 2018). Temuan tersebut mendukung adanya kemungkinan sistem budidaya menghasilkan respon metabolisme yang berbeda, tetapi kajian komparatif pada bayam merah masih terbatas. Meskipun sistem hidroponik menawarkan keunggulan berupa keseragaman morfologis, profil kimia dan potensi bioaktivitasnya perlu dievaluasi lebih lanjut agar dapat disetarakan dengan bayam merah yang tumbuh di media tanah, yang secara alami dituntut untuk memproduksi senyawa pertahanan. Ketiadaan pemetaan profil kimia yang terstandarisasi ini menyulitkan penetapan parameter kendali mutu (*quality control*) bagi industri yang mensyaratkan bahan baku bayam merah dengan spektrum khasiat bioaktif yang konsisten (Darmawan et al., 2025).

Untuk mengatasi tantangan standarisasi tersebut, evaluasi mutu bahan baku tidak lagi memadai jika hanya bergantung pada analisis kuantitatif konvensional

(seperti pengukuran total fenolik dan flavonoid). Selain itu, pendekatan tradisional memiliki keterbatasan karena hanya menyajikan nilai agregat, sehingga tidak mampu memetakan pergeseran jalur metabolisme maupun mengidentifikasi senyawa secara spesifik yang berubah akibat perbedaan sistem tanam. Penelitian mengenai *Amaranthus tricolor* L. pada kondisi stres abiotik seperti salinitas, kekeringan, dan cekaman logam berat masih banyak berfokus pada parameter fisiologis dan biokimia menggunakan analisis statistik konvensional, sementara penerapan pendekatan kemometrik untuk mengevaluasi perubahan profil metabolit masih terbatas (Amalia & Rachmawati, 2023; Elbagory et al., 2025). Oleh karena itu, pendekatan pemprofilan metabolit (*metabolite profiling*) yang bersifat eksploratif diperlukan untuk mendeteksi pergeseran berbagai senyawa sekaligus dan memetakan profil kimia tanaman secara komprehensif. Kombinasi analitik multi-platform melalui spektroskopi UV–Visible, FTIR, dan LC-HRMS dapat memberikan informasi berjenjang mengenai perubahan pola metabolik, distribusi gugus fungsi, hingga anotasi tentatif identitas senyawa, sehingga mendukung penetapan parameter mutu bayam merah secara lebih rasional (Wahyuningsih et al., 2026). Oleh karena itu, integrasi metode sidik jari spektroskopi (UV–Visible dan FTIR), kromatografi beresolusi tinggi (LC-HRMS), dan pemodelan kemometrik diperlukan untuk mengeksplorasi indikasi adaptasi metabolik serta mengidentifikasi kandidat senyawa penanda (*putative biomarker*) berdasarkan budidaya bayam merah melalui anotasi tentatif.

1.2. Rumusan masalah

Perumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana integrasi pendekatan analitik *multi-platform* (spektroskopi UV–Visible, FTIR, dan LC-HRMS) yang didukung oleh pemodelan kemometrik dapat mengklasifikasikan bayam merah (*Amaranthus tricolor* L.) berdasarkan sistem budidayanya (konvensional dan hidroponik)?
2. Bagaimana pemanfaatan teknik spektroskopi kimia yang dipadukan dengan analisis kemometrik dapat mengungkap profil metabolit sekunder serta mengidentifikasi kandidat senyawa penanda yang memiliki kadar lebih banyak berdasarkan perbedaan kondisi lingkungan budidaya pada bayam merah?

1.3. Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengklasifikasi bayam merah (*Amaranthus tricolor* L.) dari sistem budidaya konvensional dan hidroponik melalui pemodelan kemometrik (PCA, PLS-DA, dan OPLS-DA) berbasis data pemrofilan analitik multi-platform (UV-Visible, FTIR, dan LC-HRMS).
2. Mengidentifikasi kandidat senyawa penanda (*biomarker*) dan mengeksplorasi indikasi jalur metabolisme yang berkaitan dengan perbedaan kondisi budidaya bayam merah.

1.4. Manfaat penelitian

Penelitian ini memberikan informasi mengenai perbedaan profil kimia dan aktivitas antioksidan bayam merah antara sampel dari dua kondisi budidaya, serta menghasilkan kandidat senyawa penanda untuk membedakan asal budidayanya. Secara khusus, hasil penelitian dapat memberikan indikasi respons metabolit terhadap fluktuasi paparan cuaca dan ketersediaan air pada budidaya konvensional, serta perubahan konsentrasi nutrisi dan pH larutan pada budidaya hidroponik yang tercatat selama pertumbuhan. Setelah divalidasi lebih lanjut, kandidat senyawa penanda tersebut berpotensi digunakan sebagai dasar pengembangan parameter pengendalian mutu bahan baku bayam merah.

1.5. Kebaruan penelitian

Penelitian ini merupakan studi komparatif yang mengintegrasikan UV-Visible, FTIR, dan LC-HRMS dalam pendekatan pemrofilan metabolit yang bersifat eksploratif pada bayam merah hasil budidaya konvensional dan hidroponik. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya terbatas pada pengukuran senyawa tertentu atau penggunaan satu platform analisis, integrasi ketiga instrumen dengan kemometrik memungkinkan pemetaan profil kimia secara lebih menyeluruh. Kebaruan penelitian ini mencakup anotasi tentatif kandidat senyawa penanda (*putative biomarker*), eksplorasi indikasi pergeseran jalur biosintesis, dan perumusan hipotesis mengenai mekanisme adaptasi metabolik bayam merah terhadap kedua sistem budidaya.