

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kopi merupakan salah satu komoditas pertanian yang paling aktif diperdagangkan di dunia dan menjadi sumber penghidupan bagi sekitar 25 juta petani, terutama di negara berkembang. Pada tahun 2023, kopi menyumbang lebih dari 30% total ekspor Ethiopia, lebih dari 20% ekspor Burundi, dan sekitar 15% ekspor Uganda. Secara global, nilai produksi kopi mencapai puluhan miliar dolar AS per tahun, sedangkan sektor hilir seperti roasting, distribusi, dan ritel menghasilkan nilai ekonomi lebih dari 200 miliar dolar AS. Brasil dan Vietnam juga menyumbang hampir setengah produksi kopi dunia (Amrouk et al., 2025). Sejalan dengan meningkatnya konsumsi global selama periode 1993–2020, perdagangan kopi mengalami perubahan akibat fluktuasi harga internasional dan pergeseran preferensi pasar (Ibnu & Rosanti, 2022). Namun, sebagian besar nilai tambah masih terkonsentrasi di negara importir dan industri roasting berskala besar sehingga posisi tawar petani di negara produsen relatif lebih lemah (Utrilla-Catalan et al., 2022). Kondisi tersebut menjadikan mutu dan autentikasi kopi semakin penting karena berpengaruh langsung terhadap harga jual, kepercayaan konsumen, dan daya saing produk.

Salah satu tantangan utama dalam rantai pasok kopi adalah praktik adulterasi, terutama pencampuran kopi Robusta yang bernilai lebih rendah ke dalam produk yang dilabeli sebagai Arabika. Adulterasi pangan merupakan tindakan yang disengaja untuk memperoleh keuntungan ekonomi melalui pencampuran atau penambahan material asing pada bahan pangan (Anagaw et al., 2024). Pada kopi bubuk, perbedaan visual antara Arabika dan Robusta tidak lagi dapat dikenali sehingga konsumen sulit mendeteksinya. Rantai pasok yang panjang, mulai dari petani hingga ritel, semakin meningkatkan peluang terjadinya adulterasi. Selain pencampuran Arabika dan Robusta, beberapa penelitian juga melaporkan penambahan bahan lain seperti jagung, gandum, dan sekam kopi untuk meningkatkan volume produk (Munyendo et al., 2022). Praktik tersebut tidak hanya

menimbulkan kerugian ekonomi dan menurunkan transparansi pasar, tetapi juga berpotensi menimbulkan risiko kesehatan apabila bahan pencampur yang digunakan tidak aman (Anagaw et al., 2024).

Autentikasi kopi memerlukan metode analitik yang mampu membedakan karakteristik kimia yang tidak dapat dikenali secara visual maupun sensorik. Kromatografi gas (GC) merupakan salah satu teknik yang paling banyak digunakan untuk menganalisis senyawa volatil pembentuk aroma kopi karena mampu memisahkan campuran VOC kompleks dan menghasilkan fingerprint kimia yang khas (Caporaso et al., 2018). Kombinasi GC dengan teknik headspace, seperti HS-GC dan HS-GC-IMS, telah terbukti mampu membedakan Arabika dan Robusta serta mendeteksi adulterasi berdasarkan pola VOC dengan sensitivitas tinggi (Konieczka et al., 2020). Instrumen beresolusi tinggi seperti GC-MS dan GC $\times$ GC-TOFMS bahkan mampu menghasilkan fingerprint volatil yang lebih lengkap untuk autentikasi, penilaian mutu, dan identifikasi marker adulteran (Lyrio et al., 2023). Namun, biaya pengadaan, operasional, dan perawatannya relatif tinggi serta memerlukan operator yang terlatih sehingga kurang sesuai untuk skrining rutin di laboratorium pendidikan, UMKM, maupun unit pengawasan mutu berskala kecil. Oleh karena itu, beberapa penelitian menyarankan penggunaan sistem GC yang lebih ekonomis untuk skrining awal sebelum dilakukan konfirmasi menggunakan instrumen beresolusi tinggi (Salo et al., 2021).

Seiring perkembangan analisis data, integrasi GC dengan pembelajaran mesin juga semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan kemampuan klasifikasi pola volatil. Data kromatogram dapat diekstraksi menjadi sejumlah fitur dan dimodelkan menggunakan metode seperti Support Vector Machine (SVM), sehingga sistem GC yang lebih sederhana tetap mampu memberikan performa klasifikasi yang baik apabila didukung dataset yang representatif (Covaciu et al., 2023).

Pada sistem GC konvensional, pemisahan umumnya menggunakan kolom kapiler berbasis polimer seperti HP-5MS, DB-5MS, VF-5ms, dan RTX-5 yang memiliki stabilitas termal serta kemampuan pemisahan VOC yang baik (Costa et al., 2022). Untuk analit yang lebih polar digunakan kolom seperti DB-23 (Paglarini et al., 2020), sedangkan konfigurasi GC $\times$ GC dan penggunaan indeks Kovats dapat

meningkatkan resolusi pemisahan serta konsistensi identifikasi senyawa (Mozumder et al., 2022). Meskipun memberikan performa yang baik, konfigurasi tersebut memerlukan biaya yang relatif tinggi sehingga kurang sesuai untuk pengembangan sistem GC berbiaya rendah.

Sebagai alternatif, beberapa penelitian menunjukkan bahwa sistem kromatografi gas (GC) miniatur dengan packed column sederhana dapat dikembangkan dengan biaya yang jauh lebih rendah tanpa menghilangkan kemampuan pemisahan dasar. Sistem GC *low-cost* berbasis packed column dan platform Arduino telah dilaporkan mampu memisahkan gas-gas sederhana dengan biaya pembuatan kurang dari 100 dolar AS (Hinterberger et al., 2021). Penelitian lain juga mengembangkan GC *low-cost* menggunakan detektor TCD dan sensor gas SGP30 untuk mengklasifikasikan senyawa sederhana seperti toluena dan etanol menggunakan Support Vector Machine (SVM), namun belum diterapkan pada campuran volatil yang lebih kompleks seperti kopi panggang (Nurnaafi, 2025). Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengembangan GC *low-cost* telah memungkinkan, tetapi penerapannya untuk autentikasi kopi masih relatif terbatas.

Dari sisi fase diam, silika gel memiliki sifat polar dan kemampuan adsorpsi yang baik terhadap berbagai senyawa aromatik dan heterosiklik. Material ini telah lama digunakan pada kromatografi kolom untuk memisahkan fraksi aromatik dan senyawa karbazol secara bertahap melalui mekanisme adsorpsi dan desorpsi (Riccardi et al., 2020). Selain itu, silika gel juga banyak dimanfaatkan dalam analisis komponen pangan, misalnya untuk penentuan kadar kafeina melalui perbedaan interaksi analit dengan fase diam (Dulanlebit et al., 2020). Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa silika gel berpotensi dimanfaatkan sebagai fase diam pada kolom mini untuk menghasilkan fingerprint volatil kopi melalui mekanisme adsorpsi yang sederhana dan relatif ekonomis.

Di sisi lain, perkembangan sensor gas berbasis metal-oxide semiconductor (MOx) membuka peluang pengembangan detektor GC berbiaya rendah. Sensor SGP30 bekerja berdasarkan perubahan resistansi lapisan MOx akibat interaksi dengan VOC dan gas reduktan (H. Chen et al., 2024), serta telah dilengkapi kompensasi suhu dan kelembapan dalam satu paket sensor (Neubert et al., 2021). Sensor ini juga dilaporkan memiliki sensitivitas yang baik terhadap perubahan

konsentrasi VOC secara waktu nyata (Epping & Koch, 2023). Apabila ditempatkan pada ujung kolom GC, perubahan konsentrasi VOC yang keluar dari kolom dapat direkam sebagai sinyal terhadap waktu yang menyerupai kromatogram sehingga SGP30 berpotensi digunakan sebagai pseudo-detector pada sistem GC *low-cost*.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun metode berbasis GC dan GC–MS telah terbukti efektif untuk autentikasi kopi, biaya instrumen masih menjadi kendala utama. Penelitian mengenai sistem GC *low-cost* yang dipadukan dengan pembelajaran mesin telah berkembang, namun sebagian besar masih difokuskan pada gas atau senyawa sederhana. Selain itu, pemanfaatan kolom mini berdiameter kecil berbasis silika gel yang dipadukan dengan sensor gas SGP30 sebagai detektor untuk menghasilkan *fingerprint* volatil kopi serta evaluasi berbagai model klasifikasi masih relatif jarang dilaporkan.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem kromatografi gas (GC) *low-cost* berbasis sensor SGP30 melalui optimasi konfigurasi kolom untuk menghasilkan *fingerprint* volatil kopi. Konfigurasi kolom yang dievaluasi meliputi variasi panjang kolom serta penggunaan silika gel sebagai fase diam. Selanjutnya, *fingerprint* volatil yang dihasilkan dimanfaatkan sebagai masukan bagi beberapa algoritma *machine learning*, yaitu *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest* (RF), dan *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost), untuk mengklasifikasikan kopi Arabika dan Robusta. Perbandingan ketiga algoritma tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai model yang paling sesuai untuk diterapkan pada sistem GC *low-cost*. Sistem yang dikembangkan diharapkan menjadi alternatif skrining awal autentikasi kopi Arabika dan Robusta yang lebih ekonomis serta mudah diterapkan di laboratorium pendidikan maupun unit pengawasan mutu berskala kecil.

B. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik pemisahan senyawa volatil kopi pada sistem kromatografi gas *low-cost* dengan berbagai konfigurasi kolom, meliputi variasi panjang kolom dan penggunaan silika gel sebagai fase diam?

2. Bagaimana pengaruh konfigurasi kolom, meliputi panjang kolom dan kondisi penggunaan silika gel, terhadap pembentukan *fingerprint* volatil kopi yang diperoleh menggunakan sensor SGP30?
3. Apakah *fingerprint* volatil yang dihasilkan oleh sistem kromatografi gas *low-cost* dapat dimanfaatkan untuk mengklasifikasikan kopi Arabika dan Robusta menggunakan berbagai model *machine learning* secara akurat?

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem kromatografi gas *low-cost* berbasis sensor SGP30 melalui optimasi konfigurasi kolom untuk menghasilkan *fingerprint* volatil kopi, serta memanfaatkan data tersebut dalam proses klasifikasi menggunakan *machine learning*. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan sistem kromatografi gas *low-cost* berbasis sensor SGP30 untuk menghasilkan *fingerprint* senyawa volatil kopi.
2. Mengoptimasi konfigurasi kolom kromatografi, meliputi panjang kolom dan penggunaan silika gel sebagai fase diam, untuk memperoleh *fingerprint* volatil yang paling representatif.
3. Mengevaluasi kinerja algoritma *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest*, dan *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) dalam mengklasifikasikan kopi Arabika dan Robusta berdasarkan *fingerprint* volatil yang dihasilkan sistem.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat secara teoretis maupun praktis sebagai berikut.

1. Menambah pemahaman mengenai karakteristik pemisahan senyawa volatil kopi menggunakan sistem kromatografi gas *low-cost* berbasis kolom mini dan sensor SGP30.
2. Menjadi referensi dalam pengembangan sistem kromatografi gas *low-cost* untuk analisis volatil dan autentikasi produk pangan melalui integrasi kolom mini, sensor gas, dan metode pembelajaran mesin.

3. Menghasilkan sistem kromatografi gas *low-cost* yang berpotensi digunakan sebagai alternatif skrining awal autentikasi kopi Arabika dan Robusta pada laboratorium pendidikan, unit penelitian, maupun industri berskala kecil.

