

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kopi merupakan salah satu komoditas pertanian strategis yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan berperan penting dalam perekonomian Indonesia sekaligus menjadi sumber penghidupan bagi jutaan petani di berbagai daerah penghasil kopi, seperti Aceh, Sumatera Selatan, Sulawesi Selatan, dan Flores (Ditjenbun, 2023). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2025), Indonesia telah mencatatkan ekspor biji kopi sebesar 312.900,6 ton pada tahun 2024, yang mencerminkan posisi signifikan Indonesia sebagai salah satu produsen dan eksportir kopi terbesar di dunia. Posisi ini menempatkan Indonesia pada peringkat keempat dunia dalam produksi kopi, setelah Brasil, Vietnam, dan Kolombia (ICO, 2024). Maulani dan Wahyuningsih (2021), menyampaikan ada beberapa faktor yang mendorong tingginya peminat kopi Indonesia di sejumlah kawasan Eropa diantaranya, keunggulan pada cita rasanya yang khas, kualitas yang tinggi serta keragaman varietasnya. Varietas unggulan yang dikenal secara internasional antara lain Kopi Gayo (Arabika), Kopi Toraja (Arabika), Kopi Flores Bajawa (Arabika), serta kopi Robusta dari Lampung dan Sumatera Selatan (Rahardjo, 2017). Jenis biji kopi yang umumnya diekspor adalah biji kopi hijau yang lebih dikenal dengan sebutan *green bean*, hal ini dilakukan untuk memudahkan konsumen mengolah kopi dengan preferensi cita rasa yang diinginkan.

Sebelum dapat dikonsumsi, biji kopi akan melewati tahapan *roasting* (sangrai). *Roasting* merupakan proses termal kompleks yang mengubah biji kopi hijau menjadi biji kopi siap seduh melalui serangkaian reaksi fisika dan kimia yang saling berkaitan (Schenker *et al.*, 2000). Kondisi *roasting* meliputi suhu dan durasi sangat menentukan kualitas dan cita rasa kopi yang dihasilkan. Tahapan ini sangat menentukan mutu akhir kopi, baik dari aspek cita rasa, aroma, maupun sifat fisikokimia (Verma dan Yadav,

2019; Madihah *et al.*, 2013). Sifat fisikokimia adalah gabungan dari karakteristik fisik dan kimia, yang mencakup parameter seperti kadar air, pH, keasaman tertitrasi (TAT), dan kecerahan. Selama proses *roasting*, suhu biji kopi dapat mencapai 180–240°C, bergantung pada profil *roasting* yang diterapkan (Baggenstoss *et al.*, 2008). Pada kondisi tersebut terjadi reaksi Maillard yang berkontribusi pada pembentukan aroma, rasa, dan warna khas kopi (Hustiany, 2016). Reaksi Maillard adalah reaksi kimia kompleks antara gula pereduksi dan asam amino (komponen penyusun protein) yang terjadi ketika suatu bahan pangan dipanaskan pada suhu tertentu. Selain reaksi Maillard, proses degradasi asam klorogenat, karamelisasi gula, serta pembentukan senyawa volatil juga turut berkontribusi pada pembentukan profil sensorik kopi yang kompleks (Moreira *et al.*, 2012).

Penentuan level *roasting* dalam praktik industri kopi umumnya mengacu pada kategori *light*, *medium*, dan *dark roast*. Kondisi ini bersifat subjektif dan samar (*fuzzy*) karena hanya berdasarkan pengetahuan ahli dan evaluasi sensorik seperti kecerahan, aroma dan *crack*. *Crack* adalah suara letupan yang terdengar ketika uap air dan gas karbon dioksida (CO₂) menumpuk di dalam biji, menyebabkan tekanan internal meningkat hingga dinding sel tidak mampu lagi menahannya (Bolka dan Emire, 2020). Proses *light roast* biasanya dihentikan tepat saat awal letupan pertama (*first crack*) terjadi atau sesaat setelah letupan pertama berakhir. Pada tahap ini, warna biji masih cokelat muda, dan permukaannya kering (tidak berminyak). Proses *medium roast* terjadi setelah *first crack* selesai dan sebelum *second crack*. Tahap ini menghasilkan warna cokelat yang lebih gelap dengan permukaan biji masih kering. Tahap *dark roast* terjadi saat biji kopi saat letupan kedua (*second crack*). Karakteristik biji menjadi cokelat tua hingga hitam, dan permukaan biji berminyak (Herawati *et al.*, 2019).

Penentuan kategori *roasting* yang bersifat subjektif ini menyebabkan hasil akhir yang tidak konsisten, dan belum tentu sesuai dengan keinginan konsumen. Sejumlah studi telah mengkonfirmasi bahwa variabilitas pada proses *roasting* secara langsung memengaruhi profil sensorik dan penerimaan konsumen terhadap produk kopi (Moreira *et al.*, 2012). Pada kenyataannya, setiap konsumen memiliki preferensi karakteristik kopi yang berbeda-beda, seperti tingkat keasaman tertentu, kadar air yang diharapkan, serta tingkat kecerahan atau warna hasil sangrai yang diinginkan. Preferensi ini tidak hanya bersifat individual, tetapi juga dipengaruhi oleh budaya dan kebiasaan konsumsi di masing-masing negara tujuan ekspor (Samoggia & Riedel, 2018). Beberapa pendekatan instrumental seperti penggunaan spektroskopi NIR (Near-Infrared) dan pendekatan pengolahan citra digital telah dieksplorasi untuk memonitor proses *roasting* secara *real-time* (Yeretizian *et al.*, 2002), namun demikian, implementasinya memerlukan perangkat keras yang mahal dan tidak selalu tersedia di industri skala kecil-menengah. Dengan adanya perbedaan tersebut menunjukkan bahwa proses *roasting* tidak hanya bergantung pada kategori umum seperti *light*, *medium*, dan *dark*, tetapi juga perlu mempertimbangkan target sifat fisikokimia yang lebih spesifik dan terukur. Kondisi demikian menjadi penting dan menciptakan tantangan pada standarisasi terutama dalam penentuan durasi *roasting* yang optimal. Namun demikian, hubungan antara parameter fisikokimia biji kopi dan durasi *roasting* bersifat kompleks dan tidak selalu dapat dijelaskan secara eksak menggunakan pendekatan matematis konvensional. Oleh karena itu, pendekatan berbasis logika *fuzzy* menjadi alternatif yang relevan dan praktis untuk mengakomodasi ketidakpastian tersebut. Melalui sistem *fuzzy inference system*, parameter fisikokimia seperti kadar air, pH, dan kecerahan dapat digunakan sebagai variabel *input* untuk memprediksi durasi *roasting* yang sesuai,

sehingga diharapkan mampu menghasilkan karakteristik biji kopi yang lebih mendekati keinginan konsumen.

Logika *fuzzy* adalah sebuah cabang logika yang dirancang untuk merepresentasikan pengetahuan dalam kondisi yang bersifat humanis atau tidak dapat diselesaikan secara eksak (Zadeh, 1997). Berbeda dengan logika klasik (biner) yang hanya mengenal nilai benar atau salah (0 atau 1), logika fuzzy memungkinkan representasi derajat keanggotaan (*membership degree*) dalam rentang kontinu $[0, 1]$, sehingga lebih mampu merepresentasikan kondisi dunia nyata yang bersifat gradual dan tidak tegas (Ross, 2010). Sederhananya logika *fuzzy* berfungsi sebagai penghubung antara bahasa mesin yang presisi dengan bahasa manusia yang sering kali menekankan makna atau arti yang samar. Pendekatan logika *fuzzy* pada praktiknya dapat ditransformasikan menjadi nilai baku (*crisp*) melalui *fuzzy inference system (FIS)*. *Fuzzy inference system* adalah kerangka komputasi yang didasarkan pada teori himpunan *fuzzy* untuk melakukan pemetaan dari *input* yang diberikan menuju sebuah *output*. Pemodelan sistem *fuzzy* terdiri dari tiga tahap yaitu, (1) fuzzifikasi (konversi nilai numerik *input* ke dalam bentuk derajat keanggotaan fungsi keanggotaan *fuzzy*), (2) inferensi *fuzzy* (penentuan *output* berdasarkan basis aturan/*rule base*), dan (3) defuzzifikasi (konversi kembali hasil inferensi ke dalam nilai *crisp*) (Kusumadewi dan Purnomo, 2010). Sistem ini sering digunakan sebagai alat dalam sistem penunjang keputusan karena mampu menjembatani bahasa mesin yang presisi dengan bahasa manusia yang mengandung unsur ketidakpastian, ketidaktepatan, atau variasi data alami yang kompleks (Nafisah *et al.*, 2024).

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, terdapat kebutuhan untuk mengembangkan sistem pendukung keputusan yang mampu merekomendasikan durasi *roasting* secara lebih objektif, terukur, dan dapat diadaptasi sesuai preferensi fisikokimia konsumen yang beragam. Melalui *fuzzy inference system*,

parameter fisikokimia seperti kadar air, pH, dan kecerahan (nilai L) dapat digunakan sebagai variabel *input* untuk memprediksi durasi *roasting* yang sesuai, sehingga diharapkan mampu menghasilkan karakteristik biji kopi yang lebih mendekati keinginan konsumen. Penelitian ini memiliki kebaruan (*novelty*) pada penerapan FIS secara terintegrasi dengan parameter fisikokimia terukur sebagai basis penentuan durasi *roasting*, yang belum banyak dieksplorasi secara sistematis pada komoditas kopi hijau asal Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan judul **“Implementasi Sistem Fuzzy dalam Penentuan Durasi Roasting Biji Kopi Hijau berdasarkan Sifat Fisikokimia”**, dengan harapan dapat memberikan kontribusi nyata bagi standardisasi proses *roasting* di industri kopi Indonesia, khususnya pada segmen *specialty coffee* dan industri skala kecil-menengah.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hubungan antara sifat fisikokimia biji kopi dengan durasi *roasting*?
2. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem logika *fuzzy* untuk membantu menentukan durasi *roasting* berdasarkan parameter sifat fisikokimia?
3. Bagaimana akurasi dan efektivitas sistem *fuzzy* dalam memberikan rekomendasi durasi *roasting*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah:

1. Menganalisis korelasi karakteristik sifat fisikokimia biji kopi dan durasi *roasting*.
2. Merancang dan mengimplementasikan sistem logika *fuzzy* untuk menentukan durasi *roasting* yang berdasarkan sifat fisikokimia.
3. Mengevaluasi akurasi dan efektifitas sistem *fuzzy* dalam memberikan rekomendasi durasi *roasting*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dan luaran dari penelitian ini memberikan informasi terkait sifat fisikokimia pada setiap level *roasting*, memberikan informasi untuk durasi *roasting* berdasarkan kondisi aktual biji kopi tanpa menggantikan standar profil *roasting*, tetapi justru memperhalus adaptasi *roasting* terhadap bahan baku.

