

**PENGEMBANGAN SISTEM IDENTIFIKASI JENIS, INDIKASI
GEOGRAFIS, DAN TINGKAT SANGRAI KOPI BERBASIS
MULTI-CHANNEL SPECTRAL SENSOR DAN
MACHINE LEARNING**

DIANG SAGITA



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa Disertasi dengan judul “Pengembangan Sistem Identifikasi Jenis, Indikasi Geografis, dan Tingkat Sangrai Kopi Berbasis *Multi-Channel Spectral Sensor* dan *Machine Learning*” adalah karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, April 2026

Diang Sagita
NIM F1603231010

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

DIANG SAGITA. Pengembangan Sistem Identifikasi Jenis, Indikasi Geografis, dan Tingkat Sangrai Kopi Berbasis *Multi-Channel Spectral Sensor* dan *Machine Learning*. Dibimbing oleh SUTRISNO, SLAMET WIDODO, SUPARLAN dan PRADEKA BRILYAN PURWANDOKO

Industri kopi saat ini menghadapi tantangan dalam penilaian dan karakterisasi kualitas kopi seiring dengan meningkatnya permintaan kopi berkualitas tinggi (spesialti) dan kejelasan asal usul rantai pasoknya. Dengan demikian, kebutuhan akan teknik penilaian kualitas yang tepat dan andal menjadi semakin penting, tidak hanya menjamin konsistensi dan keunggulan produk kopi, tetapi juga mendukung praktik berkelanjutan dan perdagangan yang adil (tidak ada pengoplosan dan pemalsuan) dengan menyediakan standar objektif untuk mengevaluasi biji kopi mulai dari bahan baku kopi hijau (*green bean*) hingga kopi sangrai (*roasted bean*). Hal yang mendesak untuk diselesaikan pada kopi hijau adalah asal usul jenis kopi dan indikasi geografis (IG) yang merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap harga jual dan kualitas awal dari kopi sebelum disangrai. Sementara pada kopi sangrai, tingkat sangrai merupakan faktor penting khususnya untuk menjaga konsistensi citarasa dari kopi yang dihasilkan.

Penelitian terdahulu telah banyak mengembangkan teknik dan metode identifikasi untuk jenis, indikasi geografis dan tingkat sangrai kopi. Beberapa diantaranya adalah berbasis teknik kromatografi, spektrometri massa, dan yang cukup dominan adalah spektroskopi (UV-Vis, NIR). Namun demikian, penelitian berbasis spektroskopi masih menggunakan instrumen standar skala laboratorium yang biayanya masih cenderung tinggi dan terbatas dalam penerapannya secara luas khususnya di industri kopi skala kecil dan menengah. Kemajuan teknologi saat ini telah menawarkan sensor cerdas berbasis multispektral yang ukurannya kecil, rentang panjang gelombang yang cukup luas dari *visible* hingga NIR, dan biaya yang relatif rendah. Sifat akuisisi data dari sensor yang tidak merusak dan cepat, serta dipadukan dengan pemodelan *machine learning* (ML) yang unggul menjadikannya kandidat potensial untuk pengembangan sistem identifikasi kopi mulai dari jenis, IG dan tingkat sangrainya. Sejauh penelusuran yang telah dilakukan, belum ditemukan penelitian dan publikasi yang mengaplikasikan sensor spektral *multi-channel* khususnya AS7265X untuk identifikasi jenis, IG dan tingkat sangrai kopi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan utama penelitian ini adalah mengembangkan sistem identifikasi jenis, indikasi geografis, dan tingkat sangrai kopi berbasis sensor spektral *multi-channel* yang dipadukan dengan algoritma ML. Untuk mencapai tujuan tersebut, beberapa tahapan penelitian dilakukan mulai dari (1) merancang sistem akuisi data berbasis sensor spektral *multi-channel* (410–940 nm) untuk evaluasi biji kopi, (2) mengeksplorasi penggunaan sensor spektral *multi-channel* yang dipadukan dengan algoritma ML untuk identifikasi jenis dan indikasi geografis kopi hijau, (3) melakukan kajian terhadap perubahan karakteristik fisik dan spektral kopi selama penyangraian dan secara khusus mengkaji kinetika indeks Agtron yang merupakan standar nilai tingkat sangrai terkuantifikasi, (4) mengeksplorasi penggunaan sensor spektral *multi-channel* yang dipadukan dengan algoritma ML untuk memprediksi nilai Agtron dan menanamkan model terbaiknya ke dalam prototipe.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

IPB University

Pada tahap pertama, prototipe perangkat akuisisi data spektral dengan sistem perekaman data berbasis IoT berhasil dirancang dan dibangun berdasarkan kriteria desain. Dimensi keseluruhan perangkat adalah 160 mm × 160 mm × 140 mm dengan berat sekitar 600 g. Perangkat ini dapat menangkap data spektral (reflektansi) dan menyimpannya dalam sistem *cloud* berbasis *Google Sheet*. Data yang direkam meliputi tanggal, waktu, dan data original reflektansi dari kombinasi 3 LED (violet, putih, IR) yang ditangkap oleh 18 *channel* panjang gelombang 410-940 nm. Selain data spektral original, konfigurasi tambahan dilakukan dengan menangkap reflektansi LED violet pada panjang gelombang 560-705 nm (6 channel) dan LED putih pada panjang gelombang 410-535 nm (6 channel). Pendekatan ini memungkinkan penambahan informasi intrinsik yang lebih banyak dari kopi karena sumber cahaya yang berbeda memungkinkan respons nilai spektral yang berbeda pula. Komponen perangkat yang digunakan sistem ini dibangun dengan biaya dasar bahan dan komponen sekitar 2 juta rupiah.

Pada tahap kedua, dilakukan studi eksplorasi penggunaan sensor spektral *multi-channel* untuk mengidentifikasi jenis dan indikasi geografis kopi hijau. Dua jenis kopi (Arabika dan Robusta) dari empat indikasi geografis (Arabika Flores – AF, Arabika Gayo – AG, Robusta Dampit – RD, dan Robusta Temanggung – RT) digunakan sebagai sampel. Pemodelan dilakukan menggunakan algoritma ML klasifikasi seperti LDA, ANN, RF, dan SVM. Analisis fisikokimia dilakukan pada sampel untuk mengetahui sifat intrinsiknya menggunakan PCA. Hasil menunjukkan bahwa identifikasi jenis kopi mampu mencapai akurasi sempurna 100% menggunakan LDA dengan basis 24 dan 30 data spektral. Untuk identifikasi indikasi geografis, akurasi validasi tertinggi yaitu 0,917 dicapai dengan LDA menggunakan input 24 data spektral. Metode *pretreatment* data diterapkan dan kinerjanya dievaluasi. Namun, semua metode tersebut tidak memberikan peningkatan kinerja klasifikasi.

Pada tahap ketiga, sampel kopi hijau Arabika dan Robusta disangrai pada sembilan waktu yang berbeda (3-11 menit) dan dievaluasi karakteristiknya. Karakteristik yang dianalisis meliputi nilai Agtron, warna (L^* , a^* , b^* , C^* , hue), kadar air, massa 10 biji, densitas kamba dan data spektral dari 18 *channel* panjang gelombang (410-940 nm). Kinetika nilai Agtron sebagai indikator utama penyangraian dimodelkan dan korelasinya terhadap parameter fisik dan spektral dievaluasi. Hasil menunjukkan bahwa Indeks Agtron menurun secara konsisten dengan waktu penyangraian tahap 2 (> 5 menit) untuk kedua jenis kopi, mengikuti kinetika orde nol dan orde pertama (tipe II) dengan nilai R^2 tinggi dan RMSE rendah. Data gabungan menunjukkan nilai korelasi positif (r) yang tinggi antara Agtron dan L^* , b^* , dan C^* (0,91-0,95), yang menunjukkan bahwa parameter fisik ini dapat berfungsi sebagai alternatif yang andal untuk indeks Agtron. Nilai Agtron menunjukkan korelasi yang sangat tinggi dengan data spektral ($r = 0,99$) pada panjang gelombang 810 nm, 860 nm, dan 900 nm. Lebih lanjut, pemodelan matematika menggunakan data spektral individual dilakukan untuk menduga nilai Agtron. Model dengan kinerja terbaik adalah menggunakan reflektansi pada 860 nm dengan model polinomial orde kedua ($R^2_{cv} = 0,985$, $RMSE_{cv} = 4,671$).

Pada tahap keempat, studi eksplorasi penggunaan sensor spektral *multi-channel* dilakukan untuk memprediksi tingkat sangrai dalam indeks Agtron menggunakan teknik kemometrika dan ML sebagai upaya menghasilkan model prediksi yang berkinerja tinggi. Data spektral dari sampel Arabika dan Robusta



pada berbagai tingkat sangrai dikumpulkan dan dimodelkan. Pemodelan tahap satu dilakukan menggunakan teknik kemometrika klasik seperti MLR dan PLSR pada dataset terpisah (Arabika dan Robusta) dan data gabungan, sementara tahap dua dilakukan menggunakan algoritma ML seperti ANN, RF dan SVM dan digabungkan dengan teknik penyetelan hiperparameter dan pemilihan fitur. Semua pendekatan memberikan akurasi prediksi yang tinggi ($R^2v > 0,983$, $RMSEV < 4.7$, $RPD > 7.7$), bahkan dengan hanya menggunakan 50% data spektral terpilih. Selain itu, model yang dipilih berhasil diintegrasikan ke dalam perangkat mikrokontroler mandiri dan memberikan hasil yang andal (R^2 0,965–0,967 dan $RMSE < 3$), bahkan pada sampel baru dari jenis kopi yang berbeda (Liberica dan Excelsa).

Kata kunci: analisis kopi, klasifikasi kopi, spektrum elektromagnetik, tingkat sangrai kopi

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

SUMMARY

DIANG SAGITA. Development of a Coffee Identification System for Species, Geographical Indication, and Roasting Level Using a Multi-Channel Spectral Sensor and Machine Learning. Supervised by SUTRISNO, SLAMET WIDODO, SUPARLAN and PRADEKA BRILYAN PURWANDOKO

The coffee industry is currently facing challenges in assessing and characterising coffee quality, in line with the growing demand for high-quality (specialty) coffee and transparency in its supply chain. Consequently, the need for precise and reliable quality assessment techniques has become increasingly important, not only to ensure the consistency and excellence of coffee products but also to promote sustainable practices and fair trade (preventing blending and adulteration) by providing objective standards for evaluating coffee beans, from green beans to roasted beans. A key issue to be addressed in green coffee is the determination of coffee species and geographical indication, which are the most influential factors affecting the selling price and initial quality of coffee before roasting. In roasted coffee, the roasting degree is a crucial factor, particularly for maintaining the consistency of flavour in the final product.

Previous studies have extensively developed techniques and methods for identifying coffee species, geographical indication, and roasting degree. Some of these approaches are based on chromatographic techniques and mass spectrometry, while the most widely used are spectroscopic methods (UV-Vis and NIR). However, spectroscopic research still largely relies on standard laboratory-scale instruments, which remain relatively expensive and have limited widespread application, particularly within small and medium-sized coffee industries. Recent technological advances have introduced smart multispectral sensors that are compact, cover a broad wavelength range from the visible region to the NIR, and are relatively low-cost. Their rapid, non-destructive data acquisition, combined with the strong performance of machine learning (ML) modelling, makes them a promising candidate for developing coffee identification systems, including species, geographical indication, and roasting degree. To the best of our knowledge, no studies or publications have yet applied multi-channel spectral sensors, particularly the AS7265X, for identifying coffee species, geographical indication, and roasting degree.

Based on this background, the main objective of this research is to develop a coffee identification system for species, geographical indication, and roasting degree using a multi-channel spectral sensor integrated with ML algorithms. To achieve this objective, several stages of research were conducted: (1) designing a multi-channel spectral sensor-based data acquisition system (410–940 nm) for coffee bean evaluation; (2) exploring the use of multi-channel spectral sensors combined with ML algorithms to identify the species and geographical indications of green coffee beans; (3) examining the changes in physical and spectral characteristics of coffee during roasting and specifically analysing the kinetics of the Agtron index, which is the quantified standard for roasting degree; and (4) exploring the use of multi-channel spectral sensors combined with ML algorithms to predict the Agtron index and embedding the best-performing model into a prototype device.



In the first stage, a prototype of a spectral data acquisition device with an IoT-based data recording system was successfully designed and constructed according to the design criteria. The overall dimensions of the device are 160 mm × 160 mm × 140 mm, with a weight of approximately 600 g. The device can capture spectral (reflectance) data and store them in a cloud-based system using Google Sheets. The recorded data include the date, time, and original reflectance values obtained from the combination of three LEDs (violet, white, and IR) detected by 18 wavelength channels (410–940 nm). In addition to the original spectral data, an additional configuration was implemented to capture reflectance from the violet LED at wavelengths of 560–705 nm (6 channels) and from the white LED at 410–535 nm (6 channels). This approach enables the acquisition of more intrinsic information from coffee, as different light sources provide different spectral responses. The total material and component cost of the system was approximately two million rupiah.

In the second stage, an exploratory study was carried out to investigate the use of the multi-channel spectral sensor for identifying the species and geographical indication of green coffee. Two coffee species (Arabica and Robusta) from four geographical indications (Arabica Flores – AF, Arabica Gayo – AG, Robusta Dampit – RD, and Robusta Temanggung – RT) were used as samples. Modelling was conducted using classification ML algorithms such as LDA, ANN, RF, and SVM. Physicochemical analyses were also performed on the samples to determine their intrinsic properties using PCA. The results showed that coffee species identification achieved perfect accuracy (100%) using LDA with 24 and 30 spectral data inputs. For geographical indication identification, the highest validation accuracy (0.917) was achieved with LDA using 24 spectral data inputs. Data pretreatment methods were also applied and evaluated, but none improved classification performance.

In the third stage, Arabica and Robusta green coffee samples were roasted at nine different durations (3–11 minutes) and their characteristics were evaluated. The parameters analysed included the Agtron value, colour attributes (L^* , a^* , b^* , C^* , hue), moisture content, mass of 10 beans, bulk density, and spectral data from 18 wavelength channels (410–940 nm). The kinetics of the Agtron value as the main indicator of roasting were modelled, and their correlations with physical and spectral parameters were assessed. The results showed that the Agtron index consistently decreased with roasting time beyond five minutes (stage 2) for both coffee species, following zero-order and first-order (type II) kinetics with high R^2 values and low RMSE. The combined data revealed strong positive correlations (r) between Agtron and L^* , b^* , and C^* (0.91–0.95), suggesting that these physical parameters can serve as reliable alternatives to the Agtron index. The Agtron value also showed an extremely high correlation ($R = 0.99$) with spectral data at wavelengths of 810 nm, 860 nm, and 900 nm. Furthermore, mathematical modelling using individual spectral data was performed to estimate the Agtron value, with the best performance obtained using reflectance at 860 nm and a second-order polynomial model ($R^2_{cv} = 0.985$, $RMSECV = 4.671$).

In the fourth stage, an exploratory study on the use of the multi-channel spectral sensor was conducted to predict the roasting degree in terms of the Agtron index using chemometric and ML techniques, aiming to produce a high-performance predictive model. Spectral data from Arabica and Robusta samples at various roasting degrees were collected and modelled. The first-stage modelling

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

was performed using the classical chemometric technique such as MLR and PLSR on separate datasets (Arabica, Robusta, and combined), while the second stage used ML algorithms, such as ANN, RF, and SVM, combined with hyperparameter tuning and feature selection. All approaches achieved high predictive accuracy ($R^2 > 0.983$, $RMSEV < 4.7$, $RPD > 7.7$), even with 50% of the selected wavelength. Furthermore, selected model was successfully embedded into a stand-alone microcontroller device and delivered reliable results (R^2 0.965–0.967 and $RMSE < 3$), even on new samples from different coffee types (Liberica and Excelsa).

Keywords: coffee analyzer, coffee classification, electromagnetic spectrum, roasted coffee level

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





© Hak Cipta Milik IPB, Tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah; dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PENGEMBANGAN SISTEM IDENTIFIKASI JENIS, INDIKASI GEOGRAFIS, DAN TINGKAT SANGRAI KOPI BERBASIS *MULTI-CHANNEL SPECTRAL SENSOR DAN MACHINE LEARNING*

DIANG SAGITA

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi pada Ujian Tertutup Disertasi:

1. Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastira, M.Agr
2. Prof. Dr. Ir. Erliza Noor

Penguji Luar Komisi pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

1. Prof. Dr. Ir. Erliza Noor
2. Achmat Sarifudin, S.TP., M.Sc., P.hD

Judul Disertasi : Pengembangan Sistem Identifikasi Jenis, Indikasi Geografis, dan Tingkat Sangrai Kopi Berbasis *Multi-channel Spectral Sensor* dan *Machine Learning*

Nama : Diang Sagita
NIM : F1603231010

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Sutrisno, M.Agr



Pembimbing 2:
Dr. Slamet Widodo, S.TP., M.Sc



Pembimbing 3:
Dr. Ir. Suparlan, M.Agr



Pembimbing 4:
Dr. Pradeka Brilyan Purwandoko, S.TP



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastara, M.Agr
NIP 196110191986011002



Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi
Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr
NIP 196105021986031002



Tanggal Ujian Tertutup : 12 Maret 2026
Tanggal Ujian Terbuka : 23 April 2026

Tanggal Lulus :

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *subhanahu wa ta'ala* atas karunia dan rahmat-Nya sehingga Disertasi yang berjudul “Pengembangan Sistem Identifikasi Jenis, Indikasi Geografis, dan Tingkat Sangrai Kopi Berbasis *Multi-channel Spectral Sensor* dan *Machine Learning*” dapat diselesaikan. Shalawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad *shalallahu 'alaihi wasallam*.

Selama menempuh studi dan menyelesaikan disertasi ini, penulis telah menerima banyak arahan, bimbingan, dukungan baik moril maupun materiil, pencerahan ilmu, serta berbagai kemudahan fasilitas yang sangat membantu proses studi. Dengan penuh hormat dan rasa terima kasih yang mendalam, penulis menyampaikan penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Sutrisno, M.Agr; selaku ketua komisi pembimbing; Dr. Slamet Widodo, S.TP., M.Sc; Dr. Ir. Suparlan, M.Agr; dan Dr. Pradeka Brilyan Purwandoko, S.TP selaku anggota komisi pembimbing; yang atas dedikasi dan kesabarannya dalam membimbing, memberikan masukan, saran serta mengarahkan bobot akademis dalam disertasi ini.
2. Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastira M.Agr. dan Prof. Dr. Ir. Erliza Noor selaku penguji luar komisi pada ujian tertutup yang telah menyediakan waktu dan pikirannya untuk menelaah dan memberikan banyak masukan dan arahan dalam menyempurnakan disertasi ini.
3. Tim sekretariat prodi TEP (Dr. Muhamad Yulianto, Dr. Liyantono dan Pak Ahmad Mulyawatullah) atas arahan dan bantuannya dalam mendukung penyelesaian studi dan disertasi ini.
4. Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah memberikan dukungan berupa beasiswa *degree by research* dan juga fasilitas riset selama studi dan penelitian.
5. Keluarga besar prodi Ilmu Keteknikan Pertanian, IPB University, rekan-rekan yang selalu memberikan dukungan dan kebersamaan, serta para dosen khususnya Dr. Wawan Hermawan, Dr. Agus Sutejo, Dr. Gatot Pramuhadi, atas semangat dan dukungannya.
6. Pimpinan dan Kolega di Pusat Riset Teknologi Tepat Guna dan Pusat Riset Teknologi Manufaktur Peralatan BRIN yang telah memberikan bantuan selama studi dan pelaksanaan penelitian.
7. Kedua orang tua penulis, adik-adik, dan seluruh keluarga besar, juga para guru atas doa-doa, dukungan dan semangat yang diberikan. Ucapan terima kasih teristimewa penulis sampaikan kepada istri dan kedua buah hati tercinta, Mira Nurviana, Nufaisah Maryam dan Zaid Abdurrahman, atas segala dukungan dan pengorbanan selama penulis menyelesaikan studi doktoral.

Akhir kata, penulis berharap disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan, dan teknologi yang dikembangkan dapat bermanfaat bagi masyarakat luas, serta menjadi rujukan dan rangsangan untuk penelitian lebih lanjut.

Bogor, April 2026

Diang Sagita

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----------|
| DAFTAR TABEL | xvii |
| DAFTAR GAMBAR | xviii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xx |
| DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG | xxi |
| I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 4 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 4 |
| 1.5 Ruang Lingkup Penelitian | 4 |
| 1.6 Kebaruan Penelitian | 6 |
| II TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| 2.1 Riset Terbaru Mengenai Teknik Evaluasi dan Karakterisasi Kopi | 7 |
| 2.2 Tujuan Umum dalam Evaluasi dan Karakterisasi Kualitas Kopi | 9 |
| 2.3 Klasifikasi dan Autentikasi Keaslian Kopi | 10 |
| 2.4 Evaluasi Tingkat Sangrai dan Profil Seduh Kopi | 13 |
| 2.5 Indeks Nilai Agtron | 17 |
| 2.5 Modul Sensor Spektral <i>Multi-Channel</i> dan Penerapannya | 18 |
| III PERANCANGAN SISTEM AKUISISI DATA SPEKTRAL <i>MULTI-CHANNEL</i> UNTUK EVALUASI BIJI KOPI | 22 |
| 3.1 Abstrak | 22 |
| 3.2 Pendahuluan | 22 |
| 3.3 Bahan dan Metode | 23 |
| 3.4 Hasil dan Pembahasan | 26 |
| 3.5 Simpulan | 30 |
| IV IDENTIFIKASI JENIS DAN INDIKASI GEOGRAFIS BIJI KOPI HIJAU MENGGUNAKAN <i>MULTI-CHANNEL SPECTRAL SENSOR</i> DAN <i>MACHINE LEARNING</i> | 32 |
| 4.1 Abstrak | 32 |
| 4.2 Pendahuluan | 33 |
| 4.3 Bahan dan Metode | 34 |
| 4.4 Hasil dan Pembahasan | 39 |
| 4.5 Simpulan | 47 |

| | |
|--|-----|
| KINETIKA TINGKAT SANGRAI BERBASIS AGTRON DAN HUBUNGANNYA DENGAN PERUBAHAN FISIK DAN FITUR SPEKTRAL | 48 |
| 5.1 Abstrak | 48 |
| 5.2 Pendahuluan | 49 |
| 5.3 Bahan dan Metode | 50 |
| 5.4 Hasil dan Pembahasan | 53 |
| 5.5 Model Matematika untuk Prediksi Nilai Agtron | 62 |
| 5.5 Simpulan | 63 |
| VI SISTEM DETEKSI TINGKAT SANGRAI KOPI BERBASIS <i>MULTI-CHANNEL SPECTRAL SENSOR</i> | 64 |
| 6.1 Abstrak | 64 |
| 6.2 Pendahuluan | 65 |
| 6.3 Bahan dan Metode | 66 |
| 6.4 Hasil dan Pembahasan | 72 |
| 6.5 Simpulan | 84 |
| VII PEMBAHASAN UMUM | 85 |
| 7.1 Tantangan Industri Penyangraian Kopi Modern | 85 |
| 7.2 Keterbatasan Metode Analisis Konvensional dan Kebutuhan Teknologi Alternatif | 85 |
| 7.3 Kontribusi Sistem Sensor Spektral <i>Multi-Channel</i> Berbiaya Rendah | 85 |
| 7.4 Identifikasi Jenis dan Indikasi Geografis Kopi Hijau | 86 |
| 7.5 Karakterisasi Perubahan Kopi Selama Proses Penyangraian | 86 |
| 7.6 Pemodelan dan Implementasi Prediksi Tingkat Sangrai | 87 |
| 7.7 Implikasi dan Dampak Teknologi yang Dikembangkan | 87 |
| VIII SIMPULAN UMUM DAN SARAN | 89 |
| 8.1 Simpulan | 89 |
| 8.2 Saran | 89 |
| DAFTAR PUSTAKA | 90 |
| LAMPIRAN | 104 |
| RIWAYAT HIDUP | 122 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| 2.1 Tren teknik yang digunakan untuk klasifikasi dan autentikasi kopi (2020-2024) | 10 |
| 2.2 Tren teknik yang digunakan untuk menilai tingkat sangrai kopi dan profil seduhannya (2020-2024) | 15 |
| 2.3 Klasifikasi tingkat sangrai kopi berdasarkan nilai Agtron (Lighttells 2023) | 18 |
| 2.4 Karakteristik sensor AS7265X | 19 |
| 2.5 Penelitian terdahulu yang menggunakan sensor spektral <i>multi-channel</i> | 19 |
| 3.1 Konfigurasi sensor AS7265X untuk pengukuran data spektral original dan tambahan | 27 |
| 3.2 Analisis statistik kestabilan sensor AS7265X | 30 |
| 4.1 Algoritma spesifik yang digunakan dan rentang penyetelan hiperparameter untuk optimasi model | 38 |
| 4.2 Karakteristik fisikokimia sampel biji kopi hijau yang digunakan | 40 |
| 4.3 Performa ML untuk klasifikasi jenis biji kopi hijau | 42 |
| 4.4 Kinerja pembelajaran mesin menggunakan 18, 24 dan 30 data spektral asli untuk identifikasi asal biji kopi | 44 |
| 4.5 Kinerja ML menggunakan data <i>pretreatment</i> untuk mengidentifikasi IG biji kopi | 47 |
| 5.1 Analisis waktu dan suhu cracking biji kopi Arabika dan Robusta | 54 |
| 5.2 Model matematika terbaik untuk prediksi Agtron berdasarkan data spektral individual | 63 |
| 6.1 Informasi statistik dataset | 67 |
| 6.2 Kinerja model menggunakan MLR dan PLSR pada data Arabika, Robusta, dan kombinasi | 73 |
| 6.3 Performa model menggunakan MLR dan PLSR pada berbagai data <i>pretreatment</i> | 76 |
| 6.4 Performa model menggunakan MLR dan PLSR pada berbagai skenario data | 78 |
| 6.5 Performa model menggunakan pendekatan ML untuk memprediksi nilai Agtron menggunakan fitur asli dan terpilih berdasarkan teknik pemilihan fitur | 79 |
| 6.6 Kinerja model terpilih (RF dan MLR) yang diimplementasikan pada mikrokontroler | 82 |
| 6.7 Perbandingan model MLR dan RF untuk implementasi sistem prediksi Agtron pada instrumen berbasis mikrokontroler | 83 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| 1.1 Ruang lingkup dan alur tahapan penelitian secara keseluruhan | 5 |
| 2.1 Pendekatan karakteristik yang digunakan untuk evaluasi dan karakterisasi kopi berdasarkan tinjauan literatur dalam rentang tahun 2015-2024 | 7 |
| 2.2 Empat tujuan umum dalam evaluasi dan karakterisasi kualitas kopi | 9 |
| 2.3 Modul sensor AS7265X dengan kemampuan mengukur 18 <i>channel</i> panjang gelombang | 18 |
| 3.1 Diagram skema komponen yang digunakan untuk perangkat akuisisi spektral multi-saluran berbasis IoT | 24 |
| 3.2 Desain perangkat akuisisi spektral <i>multi-channel</i> berbasis IoT | 24 |
| 3.3 Prototipe perangkat akuisisi data spektral berbasis sensor AS7265X untuk evaluasi biji kopi | 26 |
| 3.4 Pengujian kestabilan pengukuran data oleh sensor AS7265X pada setiap 100 kali pengukuran | 29 |
| 3.5 Pola data spektral dari sampel biji kopi: (a) biji kopi hijau pada 2 jenis kopi dan 4 asal kopi; (b) biji kopi sangrai pada 4 tingkat sangrai | 30 |
| 4.1 <i>Confusion matrix</i> untuk evaluasi kinerja model | 39 |
| 4.2 Diagram alur pengembangan model menggunakan ML | 39 |
| 4.3 Analisis PCA karakteristik fisikokimia biji kopi hijau dari berbagai jenis sampel | 41 |
| 4.4 Perbandingan <i>confusion matrix</i> dari beberapa skenario identifikasi jenis kopi: (a) menggunakan input 18 data spektral, (b) menggunakan input 24 data spektral, (c) menggunakan input 30 data spektral | 42 |
| 4.5 Perbandingan <i>confusion matrix</i> dari beberapa skenario untuk identifikasi IG kopi: (a) menggunakan input 18 data spektral, (b) menggunakan input 24 data spektral, (c) menggunakan input 30 data spektral | 45 |
| 5.1 Diagram alir tahapan eksperimen penyangraian hingga analisis data | 51 |
| 5.2 Profil suhu empat jenis kopi selama penyangraian kopi | 53 |
| 5.3 Perubahan karakteristik fisik dan warna kopi selama penyangraian | 55 |
| 5.4 Model terbaik berdasarkan kurva fitting pada parameter Rd (Agtron) | 56 |
| 5.5 Korelasi Pearson dari karakteristik Agtron, fisik dan warna biji kopi: (a) data Arabika, (b) data Robusta, (c) data gabungan | 58 |
| 5.6 Grafik sebaran data hubungan antara karakteristik warna fisik dan indeks Agtron untuk data gabungan | 59 |
| 5.7 Korelasi Pearson dari karakteristik data Agtron dan spektral biji kopi: (a) Data Arabika, (b) Data Robusta, (c) Data gabungan | 60 |
| 5.8 Dendrogram peta panas yang menunjukkan hubungan antara sampel dan fitur spektral fisik gabungan (Skala warna: biru = 0, kuning = 0,5, dan hijau = 1) | 62 |
| 5.9 Hasil fitting terbaik dari model matematika untuk prediksi nilai Agtron | 63 |
| 6.1 Diagram alir yang mengkan proses pengembangan model | 71 |
| 6.2 Karakteristik data spektral kopi sangrai Robusta, Arabika dan data gabungan | 72 |

| | |
|--|----|
| 6.3 Plot linearitas nilai referensi versus nilai prediksi yang diperoleh dalam model MLR dan PLSR disertai interpretasi fitur | 74 |
| 6.4 Nilai koefisien regresi model MLR dan nilai X loading PLSR untuk kumpulan data terpisah | 75 |
| 6.5 Plot linearitas nilai referensi versus nilai prediksi yang diperoleh dalam model ML pada data spektral penuh dan data spektral terpilih (MVFS) | 80 |



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

| | |
|----------|--|
| A | : Accuracy (akurasi) |
| a* | : Red–green coordinate |
| ADC | : Analog-to-digital converter |
| AF | : Arabika flores |
| AG | : Arabika gayo |
| AI | : Artificial intelligence |
| ANN | : Artificial neural network |
| ANOVA | : Analysis of variance |
| AOAC | : Association of official analytical chemists |
| b* | : Yellow–blue coordinate |
| BLE | : Bluetooth low energy |
| C* | : Chroma |
| CATA | : Check-all-that-apply |
| CCM | : Co-occurrence matrix |
| CIE | : Commission internationale de l'éclairage |
| CNN | : Convolutional neural network |
| CV | : Coefficient of variance |
| DD-SIMCA | : Data-driven soft independent modeling of class analogy |
| DNA | : Asam deoksiribonukleat |
| EA | : Extractible anthocyanins |
| E-nose | : Electronic nose |
| ESP | : Espresso systems |
| E-tongue | : Electronic tongue |
| F1 | : F1-score |
| FDA | : Fisher discriminant analysis |
| FN | : False negative |
| FP | : False positive |
| FTIR | : Fourier transform infrared |
| FWHM | : Full width at half maximum |
| GC | : Gas chromatography |
| GC-MS | : Gas chromatography–mass spectrometry |
| GC-MS/MS | : Gas chromatography–tandem mass spectrometry |
| HCA | : Hierarchical cluster analysis |
| HPLC | : High performance liquid chromatography |
| I2C | : Inter-integrated circuit |
| ICP-MS | : Inductively coupled plasma–mass spectrometry |
| IG | : Indikasi geografis |
| IoT | : Internet of things |
| k | : Konstanta laju |
| kNN | : K-nearest neighbour |
| L* | : Lightness |



| | |
|----------------|---|
| LCD | : <i>Liquid crystal display</i> |
| LC-HRMS | : <i>Liquid chromatography–high resolution mass spectrometry</i> |
| LC-MS | : <i>Liquid chromatography–mass spectrometry</i> |
| LC-MS/MS | : <i>Liquid chromatography–tandem mass spectrometry</i> |
| LDA | : <i>Linear discriminant analysis</i> |
| LED | : <i>Light emitting diode</i> |
| LR | : <i>Logistic regression</i> |
| LV | : <i>Latent variable</i> |
| MI | : <i>Mutual information</i> |
| ML | : <i>Machine learning</i> |
| MLR | : <i>Multiple linear regression</i> |
| MSC | : <i>Multiplicative scatter correction</i> |
| MVFS | : <i>Majority voting feature selection</i> |
| NIR | : <i>Near infrared</i> |
| NMR | : <i>Nuclear magnetic resonance</i> |
| OCPLS | : <i>One-class partial least squares</i> |
| OCRF | : <i>One-class random forest</i> |
| P | : <i>Precision (presisi)</i> |
| PCA | : <i>Principal component analysis</i> |
| PCB | : <i>Printed circuit board</i> |
| PCR | : <i>Principal component regression</i> |
| PLS | : <i>Partial least squares</i> |
| PLS-DA | : <i>Partial least squares - discriminant analysis</i> |
| PLSR | : <i>Partial least squares regression</i> |
| PP | : <i>Pivot profile</i> |
| QDA | : <i>Quadratic discriminant analysis</i> |
| R | : <i>Recall</i> |
| r | : <i>Koefisien korelasi</i> |
| R ² | : <i>Koefisien determinasi</i> |
| RD | : <i>Robusta dampit</i> |
| Rd | : <i>Tingkat sangrai (roasting degree) dalam satuan agtron</i> |
| Rd0 | : <i>Nilai agtron saat t=0</i> |
| Rd∞ | : <i>Nilai agtron kopi pada akhir proses sangrai (mendekati gosong)</i> |
| RF | : <i>Random forest</i> |
| RFE | : <i>Recursive feature elimination</i> |
| RMSE | : <i>Root mean square error</i> |
| RPD | : <i>Ratio of prediction to deviation</i> |
| RT | : <i>Robusta temanggung</i> |
| RT-PCR | : <i>Reverse transcription polymerase chain reaction</i> |
| SCA | : <i>Specialty coffee association</i> |
| SG | : <i>Savitzky–golay</i> |
| SIMCA | : <i>Soft independent modelling of class analogy</i> |
| SNP | : <i>Single nucleotide polymorphism</i> |

| | |
|--------|--|
| SNV | : <i>Standard normal variate</i> |
| SSC | : <i>Soluble solids content</i> |
| SVM | : <i>Support vector machine</i> |
| SVR | : <i>Support vector regression</i> |
| SWNIR | : <i>Short wave near infrared</i> |
| t | : <i>Waktu sangrai (menit)</i> |
| TA | : <i>Titrateable acidity</i> |
| TGS | : <i>Taguchi gas sensor</i> |
| TN | : <i>True negative</i> |
| TP | : <i>True positive</i> |
| UART | : <i>Universal asynchronous receiver–transmitter</i> |
| UV–Vis | : <i>Ultraviolet–visible</i> |
| Vis | : <i>Visible (cahaya tampak)</i> |
| VT | : <i>Variance threshold</i> |

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.