UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak

Oleh
Nasrul Ihsan
19/452140/SPA/00721

Kopi merupakan salah satu jenis minuman paling populer di dunia, sehingga diperlukan evaluasi kualitas yang menyeluruh untuk memastikan keaslian produk dan memenuhi harapan konsumen. Metode yang sering digunakan dalam industri kopi umumnya bersifat subjektif, memakan waktu, dan membutuhkan biaya tinggi. Karena itu dibutuhkan metode alternatif seperti penggunaan hidung elektronik (*e-nose*).

Penelitian ini berfokus pada optimasi akurasi sistem *e-nose* untuk autentikasi kopi luwak melalui penerapan metode ekstraksi fitur polinomial. Fitur-fitur ini merupakan koefisien polinomial yang diperoleh dari melalui proses *curve fitting* polinomial terhadap respon sensor. Pendekatan ini dilakukan untuk merepresentasikan pola aroma kopi yang bersifat non-linear secara lebih efektif dibandingkan fitur statistik.

Empat algoritma pembelajaran mesin diterapkan dalam studi ini, yaitu *Linear Discriminant Analysis* (LDA), *Logistic Regression* (LR), *Quadratic Discriminant Analysis* (QDA), dan *Support Vector Machines* (SVM). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa model LDA dengan fitur koefisien polinomial derajat 3 menghasilkan akurasi validasi tertinggi sebesar 0,89 ± 0,04 dan akurasi pengujian sebesar 0,93. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan metode berbasis fitur statistik yang hanya mencapai akurasi validasi 0,80 ± 0,07 dan pengujian 0,87.

Kinerja sistem divalidasi lebih lanjut dengan membandingkan hasil klasifikasi *e-nose* dengan profil senyawa volatil yang diperoleh melalui analisis *gas chromatography-mass spectrometry* (GC-MS). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ekstraksi fitur polinomial secara konsisten meningkatkan kemampuan sistem *e-nose* dalam membedakan kopi luwak dan non-luwak, serta memiliki potensi sebagai metode autentikasi aroma yang objektif dan efisien.

Kata kunci: *e-nose*, kopi luwak, pembelajaran mesin, ekstraksi fitur polinomial, autentikasi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Optimizing Electronic Nose Accuracy using Polynomial Feature Extraction and Machine Learning Algorithm for Civet Coffee Authentication

by

Nasrul Ihsan
19/452140/SPA/00721

Coffee is one of the most widely consumed beverages worldwide, requiring rigorous quality evaluation to ensure authenticity and meet consumer expectations. Conventional methods in the coffee industry are often subjective, time-consuming, and costly. As an alternative, this study employs an electronic nose (e-nose).

The research focuses on optimizing the classification accuracy of an e-nose system for civet coffee authentication by applying polynomial feature extraction. These features, derived as polynomial coefficients through curve fitting of sensor responses, are designed to more effectively capture complex non-linear aroma patterns compared to conventional statistical features.

Four machine learning algorithms were evaluated: Linear Discriminant Analysis (LDA), Logistic Regression (LR), Quadratic Discriminant Analysis (QDA), and Support Vector Machines (SVM). Results showed that the LDA model with third-degree polynomial features achieved the highest validation accuracy of 0.89 ± 0.04 and test accuracy of 0.93, outperforming models based on statistical features (validation: 0.80 ± 0.07; test: 0.87).

To further validate performance, e-nose classifications were compared with volatile compound profiles obtained through gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS). Findings confirm that polynomial feature extraction consistently enhances the capability of e-nose systems to distinguish civet and non-civet coffee, highlighting its potential as a reliable, objective, and efficient aroma-based authentication method.

Keywords: e-nose, civet coffee, machine learning, polynomial feature extraction, authentication

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sejak pertama kali diperkenalkan oleh Persaud dan Dodd pada tahun 1982, hidung elektronik (*electronic nose, e-nose*) telah berkembang pesat sebagai alat untuk mendeteksi, mengidentifikasi, dan menganalisis senyawa volatil dalam berbagai bidang. Teknologi ini dirancang untuk meniru sistem penciuman manusia dengan menggunakan larik sensor gas yang merespon berbagai senyawa kimia dalam bentuk sinyal listrik, yang kemudian diproses oleh sistem kecerdasan buatan (Karakaya et al., 2020).

Prinsip kerja *e-nose* didasarkan pada perubahan sifat listrik sensor saat berinteraksi dengan senyawa volatil di sekitarnya. Perubahan ini terekam sebagai data deret waktu yang dapat dianalisis secara komputasional. Sensor yang digunakan dalam *e-nose* antara lain *Metal Oxide Semiconductor* (MOS), *Conducting Polymer* (CP), *Quartz Crystal Microbalance* (QCM), dan *Surface Acoustic Wave* (SAW) (Staerz et al., 2020). Sensor MOS merupakan sensor yang paling banyak digunakan dalam *e-nose*. Sensor ini bekerja dengan cara mengubah konduktivitasnya ketika gas teradsorpsi pada permukaannya, Sinyal listrik yang dihasilkan oleh masing-masing sensor ini kemudian diubah ke dalam bentuk digital dan dianalisis menggunakan berbagai teknik pemrosesan data, seperti ekstraksi fitur, reduksi dimensi, dan algoritma klasifikasi (Berna, 2010).

Metode deteksi yang digunakan dalam *e-nose* memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode analisis bau konvensional, antara lain sensitivitas yang tinggi pada konsentrasi sampel yang rendah, kecepatan analisis, kemampuan mendeteksi berbagai macam senyawa kimia, dan portabilitas perangkat. Keunggulan tersebut membuat *e-nose* dapat digunakan dalam berbagai aplikasi (Triyana and Hidayat, 2023).

Dalam beberapa dekade terakhir, *e-nose* telah digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk industri makanan dan minuman (Dhar et al., 2018), deteksi penyakit melalui analisis nafas pasien (Hidayat et al., 2022),

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

serta pemantauan kualitas lingkungan (Röck et al., 2008). Salah satu bidang yang sesuai dengan penggunaan *e-nose* adalah industri kopi, terutama dalam hal autentikasi dan klasifikasi kopi berdasarkan karakteristik aroma volatilnya. Aroma kopi sangat kompleks karena terdiri dari ratusan senyawa volatil yang terbentuk selama proses pemanggangan biji kopi (Caporaso et al., 2022; Masino et al., 2022). Oleh karena itu, teknologi, seperti perangkat *e-nose,* menjadi alat yang menjanjikan untuk mengklasifikasikan kopi berdasarkan varietas, daerah asal, tingkat pemanggangan, hingga membedakan kopi asli dan palsu.

Kopi merupakan komoditas bernilai tinggi secara global, dengan pasar yang terus berkembang mencapai USD 134,25 miliar pada 2023 (Ridder, 2022). Autentikasi kopi menjadi sangat penting mengingat adanya praktik pemalsuan produk premium, seperti kopi luwak, yang merupakan salah satu kopi termahal di dunia. Kopi luwak memiliki profil aroma yang unik karena fermentasi alami dalam sistem pencernaan Luwak (*Paradoxurus hermaphroditus*), yang mengubah komposisi senyawa volatilnya (Marcone, 2004). Profil aroma unik ini yang meningkatkan nilai ekonominya hingga 10-15 kali lipat dibandingkan kopi biasa (Hooper et al., 2022). Kopi luwak telah lama menjadi salah satu komoditas unggulan Indonesia di sektor kopi spesialti. Dengan reputasi sebagai salah satu kopi termahal di dunia, kopi ini menempati posisi eksklusif di pasar global. Pada tahun 2022, menurut laporan *Verified Market Reports* dan *Research and Markets*, nilai pasar kopi luwak diperkirakan mencapai sekitar USD 6,5 hingga 7,1 miliar secara global, dan terus menunjukkan tren pertumbuhan dengan estimasi *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) sekitar 5% (International Coffee Organization, 2022). Namun, tingginya harga dan pasaran kopi luwak mendorong praktik pemalsuan dengan mencampur atau menggantinya dengan kopi biasa yang telah melalui perlakuan serupa secara artifisial (Thorburn Burns and Walker, 2021).

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai pihak telah mengungkap praktik pemalsuan kopi luwak, baik melalui pencampuran dengan kopi biasa, klaim palsu mengenai asal-usul liar, hingga pemanfaatan luwak yang dipelihara secara tidak manusiawi. Seorang ahli kopi bersertifikat *Q-Grader*, Laila Wida, memperkirakan bahwa lebih dari 95% produk kopi luwak di Indonesia tidak autentik, karena menggunakan metode campuran dengan kopi biasa atau pemrosesan yang tidak sesuai standar fermentasi alami luwak. Pendapat ini diperkuat oleh investigasi Tony Wild, penggagas pengenalan kopi luwak ke Barat, yang kemudian meluncurkan kampanye "*Cut the Crap*" untuk mengkritisi eksploitasi dan penipuan di industri ini (Wild, 2013). Wild menyatakan bahwa sebagian besar kopi luwak yang beredar saat ini berasal dari luwak tangkar dalam kondisi buruk, bukan dari hewan liar seperti yang banyak diklaim produsen. Barista dan pakar kopi internasional James Hoffmann menyampaikan kritik tajam bahwa sebagian besar kopi luwak yang dijual di pasar internasional bersumber dari praktik yang tidak etis atau bahkan tidak benar-benar berasal dari proses pencernaan luwak, melainkan hanya "produk rekayasa marketing" (Hoffmann, 2020). Temuan-temuan ini mengindikasikan urgensi perlunya metode validasi ilmiah terhadap keaslian kopi luwak, terutama untuk membedakan antara kopi murni hasil fermentasi pencernaan luwak dengan produk tiruan yang hanya mengandalkan klaim tanpa dasar kimiawi atau sensorik yang kuat.

Berbagai metode telah digunakan untuk autentikasi kopi, termasuk sensoris dengan panel uji rasa (Perez et al., 2021), spektroskopi inframerah seperti (*Fourier transform infrared spectroscopy,* FTIR) (Belchior et al., 2020) dan *Near Infrared* (NIR) (de Araújo et al., 2021), serta *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) yang telah lama dianggap sebagai *gold standard* dalam analisis senyawa volatile (Marek et al., 2020). Namun, metode-metode tersebut memerlukan peralatan laboratorium canggih, biaya tinggi, serta waktu pemrosesan yang lama sehingga tidak praktis untuk digunakan di lapangan.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

E-nose menawarkan alternatif yang lebih efisien untuk mengklasifikasikan kopi dengan mendeteksi pola senyawa volatil tanpa memerlukan preparasi sampel yang kompleks. Perangkat e-nose bekerja dengan merekam perubahan yang terjadi akibat interaksi senyawa volatil dengan gas pada sensor, menghasilkan respons sinyal dalam bentuk deret waktu. Setiap sensor memberikan pola deret waktu yang unik, dan kombinasi pola dari seluruh sensor secara kumulatif diterjemahkan menjadi interpretasi terhadap karakteristik sampel tertentu. Dengan integrasi algoritma kecerdasan buatan, sistem e-nose dapat mempelajari dan mengenali pola yang ada, sehingga akurasi dalam membedakan sampel berdasarkan profil aroma volatil yang unik dapat ditingkatkan.

Namun demikian, tantangan utama dalam penggunaan e-nose adalah bagaimana meningkatkan akurasi melalui pemrosesan sinyal sensor. Keterbatasan metode ekstraksi fitur konvensional (sering digunakan), seperti statistik deskriptif (misalnya nilai maksimum, rata-rata, atau area di bawah kurva), sering kali menghambat kemampuan sistem dalam menangkap pola volatilitas aroma yang kompleks. Untuk mengatasi keterbatasan ini, pola sinyal sensor didekati dengan persamaan nonlinier melalui penerapan metode *fitting* pada respons sinyal asli. Pendekatan ini memungkinkan sistem menangkap fluktuasi dan dinamika sinyal secara lebih detail, sehingga fitur yang dihasilkan dapat merepresentasikan karakteristik aroma volatil dengan lebih akurat. Beberapa model *fitting* yang dapat diterapkan antara lain polinomial, eksponensial, Gaussian, spline, Fourier, dan wavelet transform, yang masing-masing memiliki keunggulan dalam memetakan pola deret waktu sesuai karakteristik sinyal yang dihasilkan oleh e-nose.

Hasil respon e-nose umumnya terbaca sebagai kurva perubahan tegangan terhadap waktu yang naik secara eksponensial di awal lalu kemudian stabil atau turun dalam fase pengukuran. Pola ini paling sesuai disesuaikan dengan persamaan polinomial dengan derajat tertentu. Pada pendekatan polinomial, koefisien polinomial ditwarkan menjadi fitur alternatif yang lebih fleksibel dibandingkan fitur statistik. Koefisien polinomial memungkinkan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

representasi hubungan yang lebih kompleks antara sinyal sensor dan komposisi senyawa volatil sehingga mampu menangkap pola non-linier yang tidak terdeteksi oleh metode konvensional (Zhao et al., 2022). Di bidang lain, teknik ini telah diterapkan dalam pengolahan citra untuk meningkatkan deteksi fitur pada pola kompleks (Chen et al., 2021) serta dalam pengenalan pola suara untuk meningkatkan akurasi klasifikasi sinyal akustik (Gonzalez Viejo et al., 2021). Oleh karena itu, dengan menerapkan metode ini dalam *e-nose*, diharapkan dapat meningkatkan akurasi sistem dalam mengklasifikasikan kopi luwak dan non-luwak, serta berpotensi untuk diaplikasikan dalam analisis aroma di bidang lainnya.

Dalam analisis data *e-nose*, berbagai model klasifikasi telah digunakan untuk meningkatkan akurasi identifikasi. Model seperti *Support Vector Machine* (SVM), *Linear Discriminant Analysis* (LDA), *Quadratic Discriminant Analysis* (QDA), dan *Logistic Regression* (LR) telah banyak diterapkan dalam klasifikasi pola sinyal dari sensor *e-nose* (Rodriguez Lujan et al., 2016). SVM dikenal memiliki performa yang baik dalam mengklasifikasikan data dengan margin yang optimal, sementara LDA dan QDA digunakan untuk membedakan kelas berdasarkan distribusi probabilitasnya. Meskipun metode-metode ini telah menunjukkan hasil yang baik dalam banyak aplikasi, keberhasilannya juga sangat bergantung pada bagaimana fitur diekstraksi dari sinyal sensor. Sebagian besar penelitian sebelumnya masih menggunakan fitur berbasis statistik seperti maksimum, rata-rata (*mean*), standar deviasi, variansi, atau transformasi sinyal seperti *Fourier Transform* (FT) dan *Wavelet Transform* (WT) untuk mengekstrak informasi dari data sensor (Llobet et al., 1999). Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam menangkap hubungan non-linier dalam data sensor, yang dapat menyebabkan kehilangan informasi penting dalam proses klasifikasi aroma yang kompleks.

Kajian yang memanfaatkan ekstraksi fitur berbasis koefisien polinomial pada data *e-nose* untuk autentikasi kopi luwak, khususnya dalam bentuk biji sangrai, masih terbatas. Padahal, bentuk biji sangrai lebih umum

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dalam perdagangan dan konsumsi. Penelitian sebelumnya juga cenderung tidak mengintegrasikan data *e-nose* dengan hasil GC-MS sebagai bentuk validasi silang untuk meningkatkan kredibilitas hasil klasifikasi.

Dari perspektif sosial dan ekonomi, penelitian ini memiliki dampak yang signifikan. Dengan adanya metode autentikasi yang lebih akurat, petani kopi luwak dapat memastikan keaslian produk mereka, yang pada akhirnya dapat meningkatkan nilai jual dan pendapatan mereka. Selain itu, metode ini dapat membantu mengurangi praktik pemalsuan kopi luwak yang sering terjadi di pasaran. Berkurangnya praktik pemalsuan akan melindungi konsumen dari produk yang tidak sesuai dengan klaimnya. Teknologi *e-nose* yang dioptimalkan dengan ekstraksi fitur berbasis polinomial juga dapat diterapkan pada produk lain dengan karakteristik aroma khas, seperti teh, cokelat, dan rempah-rempah sehingga berkontribusi pada peningkatan daya saing industri pangan berbasis volatilitas aroma.

Berdasarkan latar belakang di atas, penelitian ini bertujuan mengembangkan metode ekstraksi fitur berbasis koefisien polinomial untuk meningkatkan akurasi identifikasi aroma menggunakan *e-nose*, mengevaluasi efektivitas metode yang diusulkan dalam membedakan kopi luwak dan non-luwak. Hasil ekstraksi fitur diterapkan dalam model klasifikasi SVM, LDA, QDA dan LR. Pada setiap model dilakukan *cross validasi* dan *tuning hyperparameter* sesuai karakteristik model. Selain menggunakan *e-nose*, sampel kopi yang sama juga dianalisis dengan menggunakan GC-MS untuk mengetahui senyawa penciri (*finger print*) yang ada pada masing-masing jenis sampel. Dengan mengombinasikan *e-nose* dan GC-MS, penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan performa *e-nose* dalam klasifikasi kopi, tetapi juga memberikan justifikasi ilmiah yang kuat terhadap hasil yang diperoleh serta potensi penerapannya dalam autentikasi produk berbasis aroma volatil lainnya.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

1.2. Rumusan Masalah

1. Seberapa besar peningkatan akurasi model pembelajaran mesin dengan ekstraksi fitur polinomial dibandingkan fitur statistik konvensional dalam klasifikasi kopi luwak?
2. Bagaimana performa komparatif algoritma SVM, LDA, LR dan QDA pada dataset *e-nose* dengan fitur polinomial?
3. Apa saja senyawa penanda yang teridentifikasi dengan GC-MS yang dapat dijadikan sebagai validasi hasil klasifikasi kopi luwak menggunakan *e-nose*?

1.3. Batasan Masalah

1. Penelitian ini menggunakan sampel kopi luwak dan non-luwak dari jenis arabika yang diperoleh dari PT Perkebunan Nasional XII (PTPN XII) dalam bentuk biji sangrai standar untuk menjamin keaslian dan konsistensi sumber.
2. Sampel kopi yang diuji hanya bentuk biji yang telah disangrai (*roasted bean coffee*) oleh produsen (PTPN XII) untuk memastikan standar *roasting* yang sama.
3. Penelitian ini hanya berfokus pada penerapan fitur ekstraksi statistik dan polinomial untuk meningkatkan akurasi klasifikasi kopi.
4. Hasil pengukuran dengan *e-nose* hanya divalidasi dengan analisis senyawa penanda kopi dengan menggunakan GC-MS.
5. Tidak dilakukan modifikasi pada perangkat keras *e-nose. E-nose* hanya digunakan sebagai

1.4. Tujuan Penelitian

1. Mengembangkan model pembelajaran mesin berbasis *e-nose* dengan ekstraksi fitur koefisien polinomial untuk autentikasi kopi luwak secara efisien dan akurat.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2. Menganalisis performa komparatif algoritma SVM, LDA, LR dan QDA pada dataset *e-nose* hasil ekstraksi fitur koefisien polinomial.
3. Mengidentifikasi senyawa *finger print* kopi luwak dengan menggunakan GC-MS sebagai validasi klasifikasi kopi dengan *e-nose*

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi teoritis dalam pengembangan metode ekstraksi fitur untuk pengolahan data *e-nose*. Secara praktis metode ini dapat diterapkan dalam prototipe *e-nose* portabel berbiaya rendah untuk mendukung kontrol kualitas dan autentikasi kopi luwak oleh Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM), dengan potensi pengikatan efisiensi dan akurasi. Secara sosial-ekonomi hasil penelitian ini dapat meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap kopi luwak dan meningkatkan perlindungan konsumen serta nilai jual kopi luwak asli

1.6. Aspek Kebaruan

Aspek kebaruan dalam penelitian ini adalah penggunaan metode ekstraksi fitur berbasis polinomial. Fitur dihasilkan dari *curve fitting* persamaan polinomial terhadap data respon sinyal yang merekam aroma VOC pada sampel dalam perangkat *e-nose*. Hasil temuan menunjukkan kombinasi metode fitur ekstraksi ini dengan algoritma pembelajaran mesin SVM dan LDA menunjukkan hasil yang stabil dan akurat. Kombinasi perangkat e-nose portabel, metode fitur ekstraksi dan algoritma pembelajaran mesin yang diusulkan, serta sampel non-invasif dalam bentuk biji kopi sangrai menunjukkan keunggulan dalam proses klasifikasi dan autentikasi kopi premium seperti kopi luwak.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Teknologi Hidung Elektronik (*Electronic Nose*) dan Pembelajaran Mesin

Electronic nose (*e*-nose) adalah instrumen yang dirancang untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan aroma dengan meniru fungsi indera penciuman manusia. Sistem ini terdiri atas larik sensor gas, seperti *Metal Oxide Semiconductor* (MOS), *Conducting Polymer* (CP), *Quartz Crystal Microbalance* (QCM), dan *Surface Acoustic Wave* (SAW), yang menghasilkan sinyal listrik saat berinteraksi dengan senyawa volatil (Persaud and Dodd, 1982). Sinyal tersebut diubah menjadi pola digital yang mewakili karakteristik aroma spesifik, kemudian diproses menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk klasifikasi atau identifikasi (Keerthana and Santhi, 2020).

Data keluaran *e-nose* dikumpulkan melalui mikrokontroler, seperti *Arduino* atau *Raspberry Pi*, untuk analisis lebih lanjut. Teknik ekstraksi fitur, seperti *Principal Component Analysis* (PCA), digunakan untuk memilih informasi penting dari sinyal sensor. Algoritma pembelajaran mesin, seperti *Support Vector Machine* (SVM), *Linear Discriminant Analysis* (LDA), *Quadratic Discriminant Analysis* (QDA), dan *Logistic Regression* (LR), diterapkan untuk mengklasifikasikan pola aroma (Rodriguez-Fernandez et al., 2019). Pemilihan model ini didasarkan pada karakteristik data *e-nose* yang sering kali berdimensi tinggi, mengandung kebisingan, dan memiliki pola non-linier. SVM efektif untuk dataset dengan korelasi antar-sensor dan jumlah sampel terbatas, seperti dalam klasifikasi kopi. LDA dan QDA cocok untuk data dengan distribusi probabilitas tertentu, dengan QDA lebih fleksibel untuk variansi kelas yang berbeda. LR, sebagai model sederhana, efisien untuk klasifikasi biner, seperti membedakan kopi luwak dan non-luwak (Rodriguez Gamboa et al., 2019). Aplikasi *e-nose* sangat signifikan dalam industri makanan dan minuman, khususnya untuk klasifikasi kopi berdasarkan profil aroma volatilnya, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 2.1 Aplikasi *e-nose* dalam klasifikasi kopi dan minuman

Data	Tujuan	Konfigurasi *E-nose*	Referensi
Kopi	Mengklasifikasikan sampel kopi instan	PEN2	(Makimori and Bona, 2019)
Teh dan kopi	Mengklasifikasikan sampel teh dan kopi	TGS822, TGS830, TGS825, dll.	(Omatu and Yano, 2016)
Kopi	Mendeteksi aroma biji kopi sangrai	Agrinose (MOS)	(Marek et al., 2020)
Kopi	Mengklasifikasikan varietas kopi	MOS sensors	(Rodriguez Gamboa et al., 2019)

Penggunaan *e-nose* tidak terlepas dari algoritma pembelajaran mesin yang digunakan. Tabel 2.2 menunjukkan performa model pembelajaran mesin dalam aplikasi *e-nose* untuk kopi.

Tabel 2.2 Performa model pembelajaran mesin pada aplikasi e-*nose*

Data	Pembelajaran Mesin	Performa	Referensi
Kopi	LDA, Common Dimension Analysis	Akurasi 92% untuk klasifikasi varietas kopi	(Makimori and Bona, 2019)
Teh dan kopi	LVQ	Akurasi 96% untuk teh, 98% untuk kopi	(Omatu and Yano, 2016)
Kopi	SVM, LDA	Akurasi 95% untuk deteksi aroma biji sangrai	(Marek et al., 2020)
Kopi	SVM, LDA, LR	Akurasi 94% untuk klasifikasi varietas kopi	(Rodriguez Gamboa et al., 2019)

2.2. Senyawa Volatil Kopi dan Kopi Luwak

Kopi memiliki komposisi kimia yang kompleks, terdiri atas senyawa volatil dan non-volatil yang mempengaruhi aroma, rasa, dan kualitasnya.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Senyawa volatil, seperti aldehid, keton, alkohol, ester, pirazin, dan furan, terbentuk selama proses penyangraian dan dipengaruhi oleh faktor seperti varietas, asal geografis, dan metode pengolahan (Poisson et al., 2017). Kopi luwak, yang dihasilkan melalui fermentasi alami dalam sistem pencernaan *Paradoxurus hermaphroditus*, memiliki profil aroma unik karena perubahan komposisi senyawa volatil, seperti peningkatan ester dan asam organik (Marcone, 2004). Penelitian oleh Marek et al. (2020) menunjukkan bahwa senyawa seperti 2-methylpyrazine, guaiacol, dan dimethyl disulfide berperan penting dalam profil aroma kopi sangrai, yang dapat menjadi penanda (*fingerprint*) untuk kopi luwak. Tingginya nilai ekonomi kopi luwak mendorong praktik pemalsuan, seperti pencampuran dengan kopi biasa atau pemrosesan artifisial (Wild, 2013). Hal ini menekankan pentingnya metode autentikasi yang akurat, seperti *e-nose*.

Penelitian sebelumnya tentang klasifikasi kopi menggunakan *e-nose* telah berhasil membedakan varietas *Coffea arabica* (Arabika) dan *Coffea canephora* (Robusta) berdasarkan aroma (Wang et al., 2020). Namun, studi spesifik tentang kopi luwak masih terbatas, terutama pada biji sangrai yang lebih umum dalam perdagangan. Autentikasi kopi luwak memerlukan deteksi senyawa volatil spesifik yang tidak hanya bergantung pada analisis sensoris atau spektroskopi, tetapi juga metode cepat dan portabel seperti *e-nose* (Hooper et al., 2022).

2.3. Metode Kromatografi untuk Analisis Kopi

Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) adalah metode standar untuk mengidentifikasi senyawa volatil dalam kopi, termasuk penanda aroma seperti 2-methylpyrazine dan pyridine (de Toledo et al., 2017). Teknik ini sering digabungkan dengan *Solid-Phase Microextraction* (SPME) untuk ekstraksi senyawa volatil dengan preparasi sampel yang sederhana (Bicchi et al., 1997). Tabel 2.4 menunjukkan metode kromatografi utama untuk analisis kopi.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

GC-MS telah digunakan untuk memvalidasi hasil *e-nose* dalam klasifikasi kopi berdasarkan asal geografis atau varietas. Dalam konteks kopi luwak, GC-MS dapat mengidentifikasi senyawa penanda yang dihasilkan dari fermentasi alami, seperti ester atau asam organik, untuk memverifikasi hasil klasifikasi *e-nose*. Meskipun akurat, GC-MS memerlukan peralatan laboratorium canggih dan waktu analisis yang lama, sehingga *e-nose* menawarkan alternatif yang lebih praktis untuk autentikasi di lapangan (Hidayat et al., 2022).

2.4. Metode Ekstraksi Fitur dan Klasifikasi dalam *E-nose*

Akurasi sistem *e-nose* bergantung pada metode ekstraksi fitur dan klasifikasi yang digunakan. Ekstraksi fitur bertujuan mengidentifikasi informasi relevan dari sinyal sensor, sedangkan klasifikasi mengelompokkan data berdasarkan pola aroma (Rodriguez-Fernandez et al., 2019). Metode ekstraksi fitur seperti statistik konvensional (rata-rata, standar deviasi) dan transformasi sinyal (*Fourier Transform*, *Wavelet Transform*), sering kali gagal menangkap hubungan non-linier dalam data sensor, terutama untuk aroma kompleks seperti kopi luwak (Llobet et al., 2011).

Principal Component Analysis (PCA) umum digunakan untuk reduksi dimensi, tetapi kurang efektif dalam membedakan aroma dengan karakteristik mirip (Wang et al., 2020)(Kombo et al., 2024). Sebagai alternatif, ekstraksi fitur berbasis koefisien polinomial menawarkan solusi dengan merepresentasikan hubungan non-linier, meningkatkan performa model seperti SVM dan LDA (González-Viejo et al., 2021). SVM, dengan kemampuan menangani data berdimensi tinggi, sangat cocok untuk fitur polinomial, sementara LDA dan QDA efektif untuk dataset dengan distribusi kelas yang jelas (Yan et al., 2022). LR, meskipun sederhana, dapat digunakan untuk klasifikasi biner dengan akurasi tinggi pada data terbatas. Tabel 2.3 membandingkan metode ekstraksi fitur berdasarkan akurasi dan kelemahannya.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 2.3 Perbandingan metode ekstraksi fitur untuk e-*nose*

Metode Ekstraksi Fitur	Deskripsi	Akurasi	Kelemahan
Statistik (Rata-rata, Standar Deviasi)	Ekstraksi fitur sederhana berdasarkan statistik	75-85%	Tidak menangkap pola non-linier
PCA	Reduksi dimensi dengan komponen utama	80-88%	Kurang efektif untuk aroma mirip
Wavelet Transform	Ekstraksi fitur frekuensi dan waktu	85-90%	Kompleksitas komputasi tinggi
Koefisien Polinomial	Representasi hubungan non-linier	90-95%	Memerlukan optimasi parameter
Deep Learning (Autoencoder)	Ekstraksi fitur otomatis dengan jaringan saraf	92-96%	Membutuhkan data pelatihan besar

2.5. Relevansi Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian ini mengoptimalkan akurasi *e-nose* untuk autentikasi kopi luwak dalam bentuk biji sangrai menggunakan algoritma pembelajaran mesin (SVM, LDA, QDA, LR) dan ekstraksi fitur berbasis koefisien polinomial. Tabel 2.4 merangkum relevansi penelitian ini dengan studi sebelumnya.

Tabel 2.4 Relevansi penelitian dengan penelitian terdahulu

Aspek	Penelitian Ini	Studi Lain	Referensi
Alat	*E-nose* dengan sensor MOS	*E-nose* dengan sensor MOS dan CP	Zhang et al. (2020)
Sampel	Kopi Arabika, luwak, biji sangrai	Kopi Arabika, Robusta, campuran	Wang et al. (2020)
Metode Pembelajaran Mesin	SVM, LDA, QDA, LR	SVM, Random Forest, Neural Network	Li et al. (2023)
Ekstraksi Fitur	Koefisien polinomial (orde-2, orde-3)	PCA, *Wavelet Transform*	Rodriguez-Fernandez et al. (2019)
Target Akurasi	>90% untuk kopi luwak vs non-luwak	85-92% untuk varietas kopi	Chen et al. (2023)

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Validasi	GC-MS sebagai standar	GC-MS, panel sensoris	Kim et al. (2023)

Penelitian ini mengisi kesenjangan (*research gap*) dengan: (1) menggunakan biji sangrai untuk autentikasi kopi luwak, yang lebih umum dalam perdagangan, (2) menerapkan ekstraksi fitur koefisien polinomial untuk menangkap pola non-linier, dan (3) mengintegrasikan *e-nose* dengan GC-MS untuk validasi ilmiah. Selain itu, penelitian ini memiliki dampak sosial-ekonomi, seperti peningkatan nilai jual kopi luwak asli, perlindungan konsumen dari pemalsuan, dan potensi aplikasi *e-nose* portabel untuk UMKM (Hooper et al., 2022; Wild, 2013).

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Akurasi Hidung Elektronik dengan Fitur Ekstraksi Polinomial dan Algoritma Pembelajaran Mesin untuk Autentikasi Kopi Luwak
Nasrul Ihsan, Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si.; Wahyono, S.Kom. Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB III DASAR TEORI

3.1. Electronic Nose (E-nose)

E-nose merupakan sebuah instrumen dengan sistem kerja menyerupai atau meniru indra penciuman manusia. Sistem kerja tersebut memungkinkan *e-nose* untuk mengenali berbagai jenis gas dan bau. *e-nose* tersusun atas larik sensor yang menggunakan *chemo sensor*, sistem antarmuka, dan sistem pengenalan pola yang berperan dalam pemrosesan sinyal sehingga mampu membedakan suatu aroma sederhana hingga kompleks (Vanneste and Geise, 2002).

3.1.1. Sistem penciuman biologis

Proses penciuman pada manusia merupakan suatu interaksi antara molekul yang terdapat di udara dengan saraf reseptor yang terdapat pada epitel penciuman di bagian atas rongga hidung. Molekul tersebut merupakan campuran senyawa-senyawa hidrofobik yang mudah menguap dengan berat molekul kurang dari 300 Da. Dalam sistem penciuman, reaksi kimia tidak begitu penting untuk dibahas karena molekul hanya merangsang reseptor penciuman dan menghasilkan sinyal tanpa adanya perubahan pada struktur kimia molekul tersebut. Kebanyakan sensasi bau atau aroma yang dihasilkan pada proses penciuman tidak berasal dari satu jenis molekul tetapi campuran ratusan molekul dengan konsentrasi yang sangat rendah. Setiap komponen molekul bergabung secara harmonis dengan komponen lainnya sehingga menimbulkan suatu persepsi bau tertentu (Jha, 2010).

Proses penciuman manusia dimulai dari menghirup campuran molekul dengan konsentrasi yang beragam dan diteruskan ke lapisan mukosa pada bagian atas rongga hidung. Lapisan mukosa merupakan sekresi lipid yang diproduksi oleh kelenjar Bowman untuk membasahi permukaan reseptor di epitel penciuman. Lipid pada mukosa akan melarutkan molekul-molekul bau dan membawanya menuju silia pada saraf reseptor penciuman. Proses penerimaan terjadi pada silia, dimana molekul bau akan diikat sementara oleh