



Aplikasi E-nose dengan Kemometrik untuk Monitoring Proses Fermentasi Teh Kombucha

Budi Sumanto^{1*}, Yessi Idianingrum TW², Shafura Humaira³, Ratna Lestari Budiani⁴, Muhammad Arrofiq⁵ 

^{1,2,3,4,5}Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received August 02, 2022

Revised August 09, 2022

Accepted December 14, 2022

Available online April 25, 2023

Kata Kunci:

-E-nose, Sensor Gas, Kemometrik, Fermentasi, Teh Kombucha, LDA

Keywords:

E-nose, Gas Sensor, Chemometrics, Fermentation, Kombucha Tea, LDA



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Teh kombucha adalah minuman teh manis hasil fermentasi menggunakan Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast (SCOBY) yang saat ini mulai banyak di produksi dan di konsumsi karena manfaatnya untuk kesehatan. Lamanya proses fermentasi akan berpengaruh terhadap kelayakan dan kualitas teh tersebut untuk dikonsumsi selain menghasilkan aroma yang khas tentunya. Tujuan dari penelitian ini adalah menerapkan electronic nose (E-nose) untuk mempelajari proses fermentasi teh kombucha dengan menggunakan metode linier discriminat analysis (LDA). Percobaan dilakukan selama 12 hari dengan menggunakan enose yang berbasis larik sensor gas dengan menggabungkan metode LDA untuk analisis kemometrik. Hasil LDA menunjukkan pengelompokan data sesuai dengan hari selama proses fermentasi yang sesuai dengan perubahan visual pada teh. Selain itu metode LDA juga menghasilkan tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan dengan metode k-nearest neighbors (KNN), classification and regression tree (CART) dalam mengklasifikasi teh kombucha selama proses fermentasi. Sehingga dapat disepakati bahwa e-nose dapat digunakan sebagai alat ukur untuk pemantauan proses fermentasi dan pengujian kualitas teh kombucha.

ABSTRACT

Kombucha tea is a sweet drink fermented using Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast (SCOBY), which is currently being widely produced and consumed because of its health benefits. The fermentation process's length will affect the tea's feasibility and quality to be finished, in addition to having a distinctive aroma. The purpose of this study was to apply an electronic nose (E-nose) to study the fermentation process of kombucha tea using the linear discriminant analysis (LDA) method. The experiment was carried out for 12 days using an e-nose based on a gas sensor array and combining the LDA method for chemometric analysis. The LDA results show the data grouping according to the day during the fermentation process, which corresponds to the visual changes in tea. In addition, the LDA method produces better accuracy than the k-nearest neighbors (KNN), classification, and regression tree (CART) approach in classifying kombucha tea during fermentation. So it can be agreed that the e-nose can be used as a measuring tool for monitoring the fermentation process and testing the quality of kombucha tea.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil teh, berdasarkan sumber dari kementerian koordinator bidang perekonomian Republik Indonesia tahun 2022 dimana produksi teh dari PT Perkebunan Indonesia berkontribusi terhadap produksi dalam negeri sebesar 41%. Kandungan polifenol dan ketekin pada teh yang berguna sebagai antioksidan (Hotmaria Simanjuntak & Lestari, 2016) dan penangkal dari penyakit degeneratif lainnya (Saputri, Al-bari, Nahdlatul, Sunan, & Bojonegoro, 2020). Hal ini yang menyebabkan teh menjadi minuman yang populer dan sering dikonsumsi sehari-hari oleh masyarakat dunia termasuk di Indonesia. Secara umum terdapat 4 jenis teh berdasarkan proses pengolahannya yaitu jenis teh putih, teh hijau, teh hitam dan teh oolong (Alvian Nugroho, Wijaya, Hendry, & Sumanto, 2022). Teh memiliki banyak khasiat untuk kesehatan sehingga dikembangkan menjadi berbagai produk turunan, salah satunya adalah kombucha. Teh kombucha merupakan salah satu jenis teh yang dihasilkan dari proses fermentasi antara teh manis dengan mikroba (Villarreal-Soto, Beaufort, Bouajila, Souchard, & Taillandier, 2018). Jenis teh ini memiliki kelebihan jika dibandingkan dengan jenis teh biasanya karena di dalam teh kombucha terkandung asam organik dan beberapa senyawa organik serta asam amino (Ita Purnami, Anom Jambe, & Wayan Wisaniyasa, 2018). Karena kandungan tersebut berkhasiat sebagai anti oksidan dan anti bakteri untuk meningkatkan fungsi saluran pencernaan serta

*Corresponding author.

E-mail addresses: budi.sumanto@ugm.ac.id (Budi Sumanto)

meningkatkan ketahanan tubuh dan juga mampu menurunkan kadar kolesterol, tekanan darah serta memperbaiki fungsi hati dan penurunan penyebaran kanker (Leal, Suárez, Jayabalan, Oros, & Escalante-Aburto, 2018). Aroma merupakan salah satu parameter yang penting dalam menentukan kualitas suatu produk khususnya teh, karena teh dengan jumlah senyawa kimia dan volatile yang tinggi memiliki korelasi terhadap sensorik bau dan juga rasa (Inayah, Nurul, Jainudin Heremba, Samloy, & Tuapattinaya, 2019). Oleh karena itu salah satu metode yang dapat diterapkan sebagai pengujian aroma teh melalui studi *volatile organic compound* (VOC) selama proses fermentasi (Hidayat, Nuringtyas, & Triyana, 2018). Instrumen standar yang paling umum untuk menganalisis VOC adalah Gas Chromatography (GC), Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS), spektrofotometri dan kromatografi gas cair. Namun instrument ini membutuhkan waktu yang lama dan juga relatif mahal dan membutuhkan tenaga ahli dalam membaca hasilnya (Sharma et al., 2015), sedangkan produksi teh kombucha masih terbatas di kalangan masyarakat dengan waktu produksi yang relatif cepat. Oleh karena sistem larik sensor gas atau lebih dikenal dengan sebutan hidung elektronik (e-nose) bisa menjadi alternatif untuk menganalisis VOC pada teh kombucha.

Hidung elektronik (e-nose) adalah instrument yang bekerja meniru sistem penciuman pada manusia yang terdiri dari susunan sensor gas (Triyana, Tauhid Subekti, Aji, Nur Hidayat, & Rohman, 2015). Beberapa penelitian telah menggunakan e-nose untuk mendeteksi dan menganalisis proses fermentasi pada bahan makanan seperti tempe (Hidayat et al., 2018) dan keju (Abu-Khalaf & Masoud, 2022). Sedangkan untuk minuman seperti monitoring proses pembuatan teh hitam (Lazaro, Ballado, Bautista, So, & Villegas, 2018; Sharmilan, Premarathne, Wanniarachchi, Kumari, & Wanniarachchi, 2020), fermentasi teh *low-country* Sri Lanka (Sharmilan, Premarathne, Wanniarachchi, Kumari, & Wanniarachchi, 2022), dan juga klasifikasi teh hijau berdasarkan geografisnya (Yu & Gu, 2021). Hal ini telah membuktikan bahwa e-nose adalah instrument dengan sensitivitas tinggi yang mampu melakukan pengukuran volatile secara non-invasif terhadap makanan (Kovacs et al., 2020).

Berdasarkan uraian diatas maka penelitian ini akan mempelajari perubahan volatil dari proses fermentasi teh kombucha dengan menggunakan e-nose. Respon sensor pada e-nose selama proses fermentasi akan dilakukan analisis diskriminasi untuk mengetahui tahapan dari proses fermentasi berdasarkan produksi VOC selama proses fermentasi. Keluaran sensor gas yang terpasang secara larik pada e-nose merupakan data multivariat, sehingga diperlukan analisis multivariat. *Linier discriminant analysis* (LDA) merupakan salah satu metode pengenalan pola terbimbing yang dapat digunakan untuk menganalisis data multivariat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menerapkan teknologi e-nose untuk mendeteksi volatil yang dihasilkan selama proses fermentasi teh kombucha dan membedakan tahapan proses fermentasi menggunakan LDA. Selanjutnya hasil diskriminasi akan diklasifikasi menggunakan beberapa metode klasifikasi, sehingga diharapkan diperoleh e-nose yang memiliki performa yang baik dalam menganalisis dan mengklasifikasi proses fermentasi teh kombucha.

2. METODE

Tiga botol teh kombucha dengan masing-masing sebanyak satu liter digunakan sebagai sampel. Proses pembuatan teh kombucha ini dilakukan secara konvensional dengan campuran 3 liter air, 25 gram teh hitam, dan 300 gram gula serta 510 gram kombucha. Pada penelitian sebelumnya dimana campuran kombucha kemudian ditutup dengan kain atau handuk bersih untuk mencegah kontaminasi dan dibiarkan berfermentasi pada suhu kamar (18–30°C) selama 7–10 hari (Bishop, Pitts, Budner, & Thompson-Witrick, 2022), namun pada penelitian ini fermentasi dilakukan selama 12 hari pada suhu kamar dengan instrument e-nose untuk mendeteksi bau yang dihasilkan selama proses fermentasi tersebut. Pada instrument e-nose terdapat enam jenis sensor gas komersil yaitu TGS-822, TGS-2600, TGS-2611, MQ-3, MQ-9 dan MQ-135. Unit instrument e-nose yang digunakan seperti pada Gambar 1, sedangkan detail sensor gas dijelaskan pada Tabel 1. Pada sistem e-nose terdapat mikrokontroler yang berfungsi untuk mengontrol status hidup/mati kipas dan interval waktu proses sensing/purging. Selain itu sistem alur udara di set menggunakan pompa dan dua buah solenoid yang aktif secara bergantian yakni membuka dan menutup aliran udara saat proses *collecting* atau pengambilan data. Satu siklus pengambilan data sampel aroma teh kombucha dengan e-nose dilakukan selama 100 detik dengan rincian proses *flushing* selama 5 detik, *sampling* selama 25 detik dan proses *purging* selama 70 detik. Setiap pengambilan data dilakukan perulangan sebanyak 3 kali dimana nantinya data pengukuran ke-1 dan data ke-2 digunakan sebagai data latih selama proses pemodelan, sedangkan data pengukuran ke-3 digunakan sebagai data validasi untuk mengevaluasi kinerja model klasifikasi yang telah dibangun. Data yang sudah terkumpul selanjutnya dilakukan pra-pemrosesan data untuk meningkatkan dan mengoptimalkan dataset. Ini dibagi menjadi dua tahap, pengolahan dasar dan standarisasi (Li, Lai, & Chen, 2017). Umumnya, ada tiga pemrosesan dasar: metode diferensial, relatif, dan fraksional. Dalam penelitian ini, metode diferensial

digunakan sebagai pengolahan baseline, dimana nilai dinamis dari respon sensor ($X_s(t)$) dikurangi dengan nilai baseline (respon sensor minimum saat terkena udara bebas/gas referensi) ($X_s(0)$) (1). Standarisasi dilakukan dalam proses pemodelan klasifikasi.

$$Y_s = X_s(t) - X_s(0) \quad (1)$$

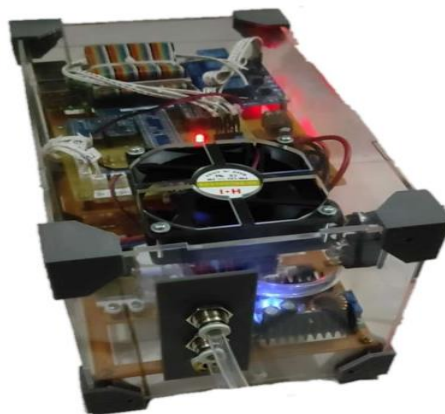
Respon dari sensor gas berbasis metal oksida yang khas terdiri dari dua proses, penginderaan, dan pembersihan. Untuk satu sampel, beberapa jalur data akan dihasilkan. Juga, tanggapan tahap awal dan tahap stasioner cenderung sama antar sampel. Oleh karena itu, diperlukan tahapan ekstraksi ciri sebelum proses klasifikasi. Hal ini untuk mengekstrak informasi penting dari respon sensor untuk mendapatkan hasil klasifikasi yang optimal (Sanaeifar, Mohtasebi, Ghasemi-Varnamkhasti, & Ahmadi, 2016; Wijaya, Sarno, & Zulaika, 2016). Beberapa metode ekstraksi ciri meliputi respon pada waktu tertentu dengan nilai statistic (Wakhid, Sarno, & Sabilla, 2022). Metode ekstraksi ciri yang diterapkan dalam penelitian ini adalah kombinasi dari nilai maksimum dari respon sensor (Y_{max}) (2), nilai mean (3) dan nilai daya spektrum frekuensi (4).

$$Y_{max} = \max(Y_s) \quad (2)$$

$$Mean = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n(x_i) \quad (3)$$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad (4)$$

Setiap data e-nose terdiri dari enam respon sensor gas, oleh karena itu, diperlukan metode analisis multivariat sebagai metode pengenalan pola volatile dari fermentasi teh kombucha. Metode yang digunakan adalah LDA yang merupakan salah satu metode yang dapat membedakan data multivariat ke dalam kelompok kategori kelas. LDA adalah teknik yang memaksimalkan varians antar kategori dan meminimalkan varians setiap kategori melalui proyeksi data dari ruang berdimensi tinggi ke ruang berdimensi rendah (linear discriminant/LD). Kriteria ini memungkinkan LDA memiliki kemampuan untuk mengklasifikasikan data target ke dalam kelas label individu (Sanaeifar et al., 2016; Wakhid et al., 2022). Pemodelan tahapan fermentasi teh dibangun melalui beberapa tahapan yaitu transformasi data, resampling, dan pemodelan. Tahap transformasi data dilakukan karena beberapa alasan. Beberapa teknik pemodelan memerlukan persyaratan yang ketat untuk menghasilkan kinerja yang maksimal, karena salah satunya adalah setiap prediktor harus memiliki skala yang sama. Pada penelitian ini tahapan proses transformasi data dilakukan dengan proses scaling dan centering. Proses penskalaan dilakukan dengan nilai masing-masing prediktor dibagi dengan standar deviasinya. Operasi pemusatan dilakukan dengan menggunakan nilai rata-rata setiap prediktor dikurangi dengan semua nilai predictor (Kuhn & Johnson, 2013). Proses resampling dilakukan dengan 10-fold cross-validation dengan sepuluh kali pengulangan. Metode grid-search digunakan untuk menentukan parameter terbaik dari model klasifikasi. Tujuan dari proses ini adalah untuk mencegah *overfitting* dan mendapatkan model klasifikasi terbaik yang dapat memprediksi tahapan fermentasi teh. Proses selanjutnya adalah membuat model klasifikasi tahapan fermentasi teh. Dalam penelitian ini digunakan tiga metode klasifikasi yaitu *Linier Discriminant Analysis* (LDA), *K-Nearest Neighbor* (kNN), dan *DecisionTreeClassifier* (CART). Data pengukuran ke-1 dan data ke-2 digunakan sebagai data latih selama proses pemodelan, sedangkan data pengukuran ke-3 digunakan sebagai data validasi untuk mengevaluasi kinerja model klasifikasi yang telah dibangun.



Gambar 1. Unit Instrumen E-Nose

Tabel 1. Daftar Larik Sensor Gas dengan Targetnya

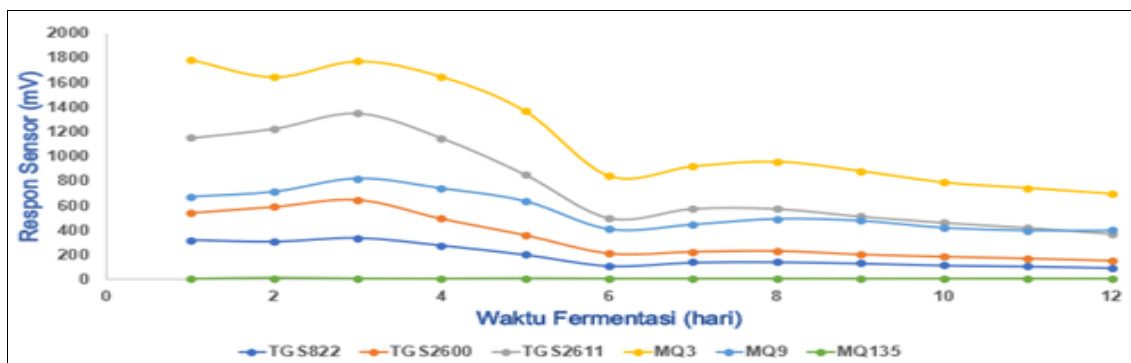
No	Sensor	Target Gas
1.	MQ-3	Alkohol
2.	MQ-9	Karbon Monoksida, Metana
3.	MQ-135	Amonia, Sulfida, uap seri Benzena
4.	TGS-822	Heksana, Benzena, Etanol
5.	TGS-2600	Metana, CO, Hidrogen, Etanol, Isobutane
6.	TGS-2611	Metana, Etanol, Hidrogen, Isobutane

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

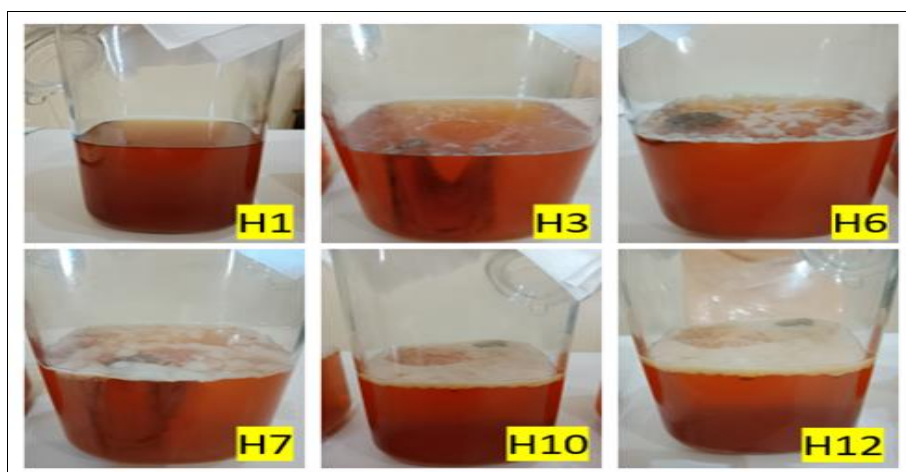
a. Proses Fermentasi Teh Kombucha

Tiga botol teh kombucha telah berhasil diuji dengan e-nose. Volatil teh kombucha selama proses fermentasi dengan tiap botol dianalisis menggunakan e-nose selama dua belas hari. Respon sensor gas pada e-nose selama proses fermentasi ditunjukkan pada **Gambar 2**. Gambar tersebut menunjukkan nilai rata-rata respon sensor gas terhadap proses fermentasi teh kombucha. Pengambilan data e-nose dimulai dari hari ke-1 yaitu sekitar 2 jam setelah teh dilakukan fermentasi atau di saat teh kombucha ini di buat hingga proses fermentasi selama 12 hari.



Gambar 2. Nilai Maksimum Rata-Rata dari Respon Sensor Gas Selama Proses Fermentasi Teh Kombucha dari Hari Ke-1 Hingga Hari ke-12

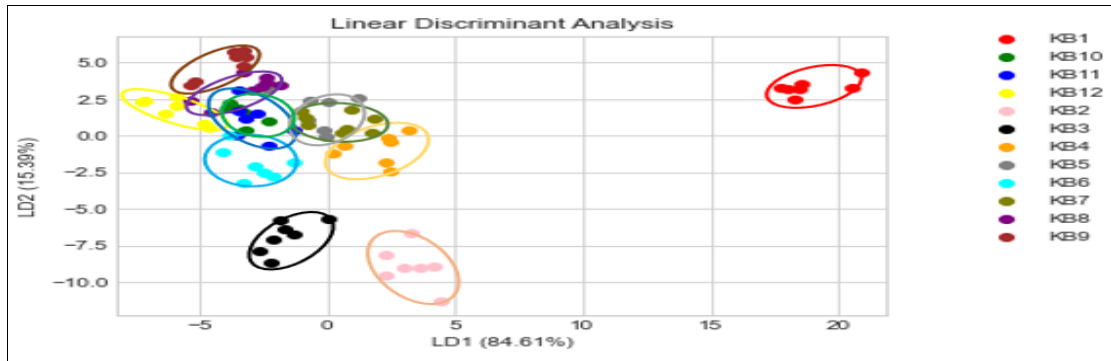
Visualisasi teh kombucha pada hari ke-1(H1), hari ke-3(H3), hari ke-6(H6), hari ke-7(H7), hari ke-10(H10), dan hari ke-12(H12) ditunjukkan pada **Gambar 3**. Secara visual terlihat waktu fermentasi <7 hari jamur SCOBY belum terbentuk secara utuh sedangkan pada hari ke-7 hampir semua permukaan telah ditutupi jamur SCOBY walaupun masih belum merata dan waktu fermentasi >7 hari permukaan air teh sudah tertutup dengan SCOBY secara merata yang semakin lama akan semakin menebal.



Gambar 3. Perubahan Fisik Teh Kombucha pada Hari Ke-1, Hari Ke-3, Hari Ke-6, Hari Ke-7, Hari Ke-10 dan Hari Ke-12.

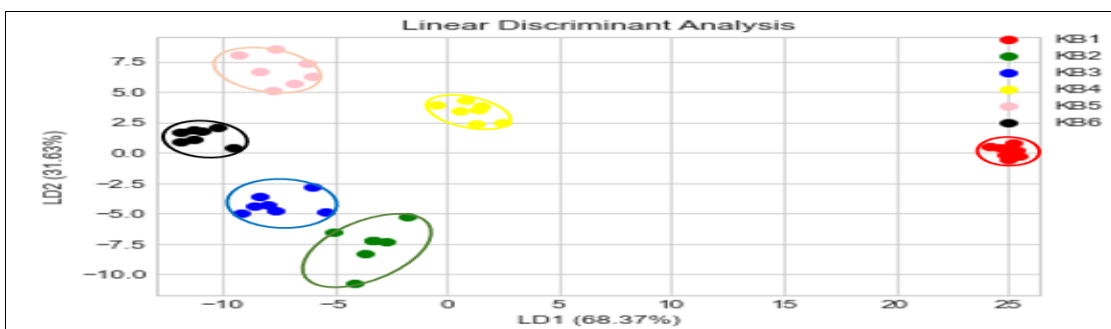
b. *Linier discriminant analysis* (LDA) dari tahap fermentasi dan klasifikasi teh kombucha

Linier discriminant analysis (LDA) adalah pengenalan pola yang terawasi, yang digunakan untuk memverifikasi kemampuan e-nose untuk mengklasifikasikan dengan benar tahapan proses fermentasi teh kombucha selama dua belas hari. Uji e-nose dilakukan tiga kali sehari selama dua belas hari, dimulai dari hari-1 setelah proses pembuatan teh kombucha sampai dengan hari ke-12 fermentasi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.

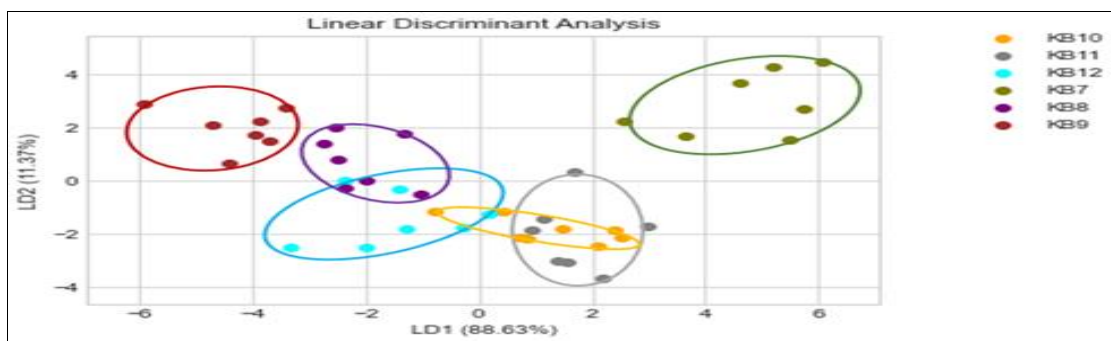


Gambar 4. Plot Nilai dari Dua Fungsi LDA pada Proses Fermentasi Teh Kombucha Selama 12 Hari

Berdasarkan referensi dimana fermentasi teh kombucha hingga siap di panen dan di konsumsi paling cepat di hari ketujuh maka kami mengklasifikasikannya ke dalam dua tahap. Tahap ini dimulai dari hari ke-1 hingga hari ke-6 dengan klaster data yang dihasilkan seperti pada Gambar 5, tahap selanjutnya pada hari ke-7 hingga hari ke-12, dapat dilihat pada Gambar 6. Oleh karena itu, kami mencoba menganalisis untuk kedua tahap ini secara terpisah. Selain itu kami juga melakukan klasifikasi dari proses fermentasi teh kombucha ini berdasarkan prediksi hari dengan menguji menggunakan beberapa metode yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil ini menunjukkan penerapan teknologi e-nose yang berbasis larik sensor gas untuk mengidentifikasi profile bau yang dihasilkan selama proses fermentasi teh kombucha dan dengan data multivariate yang diperoleh dengan menerapkan kombinasi fitur seperti pada persamaan (2), (3) dan (4) menunjukkan.



Gambar 5. Plot nilai dari dua fungsi LDA pada proses awal fermentasi (hari ke-1 hingga ke-6) teh kombucha sebagai indikasi belum matang



Gambar 6. Plot Nilai Dari Dua Fungsi LDA pada Proses Fermentasi Teh Kombucha (hari ke-7 Hingga Ke-12) Sebagai Indikasi Sudah Matang/Siap Konsumsi

Tabel 2. Hasil Evaluasi Model Klasifikasi

Model Klasifikasi	Akurasi (%)	
	Training	Validation
KNN	55,22	63,89
CART	100	55,88
LDA	88,89	83,33

Pembahasan

Teh kombucha adalah minuman fermentasi yang biasanya disebut sebagai minuman fungsional karena bermanfaat untuk kesehatan dan telah mendapat popularitas di hampir seluruh dunia dan produksi komersil minuman kombucha dan kultur mikroba telah masuk ke tingkat industri dengan mesin yang telah dikembangkan (Dutta & Paul, 2019; Laureys, Britton, & de Clippeleer, 2020). Gambar 2 menunjukkan hampir semua respon sensor gas menunjukkan tren yang menurun dari hasil deteksi gas yang dihasilkan selama proses fermentasi teh kombucha kecuali sensor MQ-135 yang terlihat datar selama 12 hari proses pemantauan. Hasil ini juga menunjukkan sensor MQ-3 yang memiliki respon tertinggi selama proses pemantauan. Grafik respon sensor juga menunjukkan pada hari ke-6 dari proses fermentasi cenderung menurun dan kemudian di hari ke-7 hampir semua sensor juga kembali naik walaupun hanya sedikit dan cenderung membentuk pola yang menyerupai proses dari awal lagi dimana grafik akan kembali menurun hingga di hari ke-12 pada proses fermentasi. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem e-nose mampu mendeteksi perubahan volatil yang terjadi selama proses fermentasi yang sesuai dengan kajian sebelumnya yang memanfaatkan e-nose sebagai pengukuran non-destruktif dan analisis cepat, serta berbiaya murah (Seesaard & Wongchoosuk, 2022).

Hasil ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan proses setelah waktu fermentasi 6 hari dan sebelumnya. Hasil ini juga menunjukkan adanya perbedaan pola volatil antara waktu fermentasi < 6 hari dan waktu fermentasi > 6 hari. Berdasarkan referensi yang menyatakan bahwa proses fermentasi teh kombucha terjadi karena peran dari *Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast* (SCOBY) selama 7 sampai dengan 10 hari (Kruk, Trzaskowska, Ścibisz, & Pokorski, 2021; Leal et al., 2018). SCOBY merupakan biofilm selulosa yang mengandung kultur simbiosis bakteri dan ragi (Laavanya, Shirkole, & Balasubramanian, 2021) yang menghasilkan komposisi volatile kimia berdasarkan waktu fermentasi yaitu jika 7 hari kandungan senyawa anions yang lebih dominan (Kumar, Narayan, & Hassarajani, 2008; Villarreal-Soto et al., 2018), untuk durasi 10 hari akan mengandung vitamin B2 dan vitamin C (Bauer-Petrovska & Petrushevska-Tozi, 2000; Villarreal-Soto et al., 2018), sedangkan durasi 12 hari sampai dengan 15 hari senyawa yang dihasilkan berupa protein (Blanc, 1996; Jayabalan, Marimuthu, & Swaminathan, 2007), Vitamin B1 dan B12 (Bauer-Petrovska & Petrushevska-Tozi, 2000).

Gambar 3 menunjukkan perubahan fisik dari teh kombucha selama proses fermentasi dimana terlihat cukup jelas pada hari ke-6 dalam proses fermentasi mulai tampak pertumbuhan jamur SCOBY walaupun belum merata dan selang sehari yakni di hari ke-7 sudah semakin meluas dan merata di permukaan air tehnya. Hal ini akan terus berlanjut hingga hari ke-12 dimana jamur SCOBY sudah semakin menebal yang mengindikasikan bahwa teh kombucha sudah siap untuk di panen atau di konsumsi. Gambar 4 menunjukkan plot skor dari dua fungsi LDA berdasarkan klasifikasi waktu fermentasi dalam satuan hari. Ada empat kluster utama yang terbentuk; kluster data hari ke-1, kluster data hari-2 dan hari ke-3 serta kluster data hari ke-4 hingga hari ke-12. Hasil ini menunjukkan adanya korelasi yang baik antara pernyataan tentang proses fermentasi yang terdiri dari dua tahap, yaitu tahap pertumbuhan jamur (proses fermentasi) dan tahap pertumbuhan bakteri. Setiap tahapan dan proses mikrobiologi dalam fermentasi teh memiliki aroma khas yang ditunjukkan dengan pola yang berbeda. Tahap pertumbuhan jamur selama proses fermentasi mulai bergeser pada hari ke-4. Terlihat pada gambar bahwa kluster data hari ke-4 mulai terpisah dari kluster pertama (awal pembuatan) serta kluster ke-2 dan ke-3 (pertumbuhan jamur). Hasil ini menyerupai penelitian sebelumnya yang menyimpulkan bahwa metode LDA dapat melakukan diskriminasi terhadap proses fermentasi pada tempe (Hidayat et al., 2018) dan juga diskriminasi teh China dengan perbedaan derajat fermentasi (Wu et al., 2014). Gambar 4 juga menunjukkan hasil dua fungsi LDA dari data fermentasi hari ke-4 hingga ke-12 yang saling tumpang tindih. Oleh karena itu, kami mengklasifikasikan data fermentasi teh kombucha berdasarkan hari fermentasi yaitu di Hari ke-1 dimulai dari waktu pembuatan hingga hari ke-12 saat teh sudah dapat di konsumsi. Gambar 5 merupakan tampilan hasil pada tahapan pertama dimana metode LDA dapat mendeskriminasi data volatil berdasarkan harinya. Grafik ini juga menjelaskan bahwa tahapan proses fermentasi teh kombucha dari hari ke-1 hingga ke-6 memiliki perbedaan yang mengindikasikan proses fermentasi telah berlangsung.

Pada Gambar 6 yang merupakan tahapan kedua dari proses fermentasi dimana pertumbuhan jamur SCOBY telah tampak secara visual. Hasil ini menampilkan data yang diperoleh terdapat irisan pada

data di hari ke-8, hari ke-10, hari ke-11 dan hari ke-12, namun varian data di hari ke-9 masih terpisah. Meskipun begitu hasil ini juga menunjukkan sebaran data dari proses fermentasi untuk data \geq hari ke-10 berada di sebagian besar nilai negatif dari sumbu x pada grafik. Sehingga fungsi LDA selain dapat mereduksi dimensi data yang diperoleh menjadi variabel nilai yang baru juga mampu mendiskriminasi varian data berdasarkan hari dalam proses fermentasi teh kombucha. Selain hasil diskriminasi LDA terhadap tahapan proses fermentasi teh kombucha selama dua belas hari, kami juga membangun model klasifikasi berdasarkan hari selama proses fermentasi. Kami menggunakan tiga model klasifikasi untuk mengklasifikasikan tahapan proses fermentasi teh kombucha, yaitu *K-Nearest Neighbor* (KNN), *Decision Tree Classifier* (CART), dan *Linier Discriminant Analysis* (LDA). Tabel 2 menunjukkan hasil akurasi dari tiga model dalam proses klasifikasi tersebut dimana nilai akurasi tertinggi pada proses pelatihan adalah metode CART dengan akurasi mencapai 100% dan terendah adalah KNN yaitu 55,22%. Namun akurasi yang tinggi dalam proses pelatihan tidak menjamin diperolehnya model klasifikasi yang dapat menghasilkan kinerja yang tinggi selama proses evaluasi. Hal ini terbukti dengan model klasifikasi yang paling baik dalam tahapan proses fermentasi teh kombucha menggunakan e-nose adalah LDA dengan nilai akurasi tertinggi dibanding dua metode yang lain pada saat di uji validasi yaitu sebesar 83,33%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem e-nose yang digabung dengan analisis kemometrik LDA dapat dijadikan instrumen untuk memantau produksi minuman dan makanan yang dihasilkan dari proses fermentasi.

4. SIMPULAN

Keberadaan teh fermentasi khususnya teh kombucha mulai banyak diproduksi di Indonesia, tetapi studi yang dilakukan dengan perangkat e-nose untuk memantau kualitas teh yang dihasilkan tidak tersedia. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi perintis studi untuk memperkenalkan sistem e-nose untuk memantau tahap fermentasi. Penelitian ini mencatat profil sensor e-nose terhadap aroma teh kombucha yang dideteksi selama 12 hari dengan mempertimbangkan keenam nilai sensor pada e-nose. Namun perlu diperhatikan bahwa waktu fermentasi akan sangat tergantung pada kondisi iklim dan proses produksi yang unik di produsennya dan juga pemilihan serta permintaan akan kualitas teh yang ada di pasaran. Oleh karena itu e-nose dapat dimanfaatkan untuk kedepannya sebagai standar alat uji mutu teh fermentasi, sehingga sesuai dengan standar yang telah ditentukan.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan hibah penelitian sesuai dengan kontrak nomor: 2559/UN1.P.III/Dit-Lit/PT.01.03/2022 dan semua pihak yang telah membantu terselesaikannya penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Khalaf, N., & Masoud, W. (2022). Electronic Nose for Differentiation and Quantification of Yeast Species in White Fresh Soft Cheese. *Applied Bionics and Biomechanics*. <https://doi.org/10.1155/2022/8472661>.
- Alvian Nugroho, A., Wijaya, W., Hendry, J., & Sumanto, B. (2022). Seleksi Fitur Aroma Teh Kombucha menggunakan ANN untuk Optimasi Kinerja Sistem E-nose. *ELKOMIKA*, 10(2), 334–349. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v10i2.334>.
- Bauer-Petrovska, B., & Petrushevska-Tozi, L. (2000). Mineral and water soluble vitamin content in the Kombucha drink. *International Journal of Food Science and Technology*, 35(2). <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00342.x>.
- Bishop, P., Pitts, E. R., Budner, D., & Thompson-Witrick, K. A. (2022). Kombucha: Biochemical and microbiological impacts on the chemical and flavor profile. *Food Chemistry Advances*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100025>.
- Blanc, P. J. (1996). Characterization of the tea fungus metabolites. *Biotechnology Letters*, 18(2). <https://doi.org/10.1007/BF00128667>.
- Dutta, H., & Paul, S. K. (2019). Kombucha Drink: Production, Quality, and Safety Aspects. *In Production and Management of Beverages*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815260-7.00008-0>.
- Hidayat, S. N., Nuringtyas, T. R., & Triyana, K. (2018). Electronic Nose Coupled with Chemometrics for Monitoring of Tempeh Fermentation Process. *Proceedings - 2018 4th International Conference on Science and Technology*, ICST. <https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528580>.
- Hotmaria Simanjuntak, D., & Lestari, D. (2016). Fishtech-Jurnal Teknologi Hasil Perikanan Karakteristik Kimia dan Aktivitas Antioksidan Kombucha dari Tumbuhan Apu-apu (*Pistia stratiotes*) Selama

- Fermentasi, 5(2), 123–133.
- Inayah, S. N., Nurul, W., Jainudin Heremba, M., Samloy, Y., & Tuapattinaya, P. M. J. (2019). Uji Organoleptik Enhalus Tea Berdasarkan Cara Pengeringan Dan Tingkat Ketuaan Daun Secara Morfologi. *Scie Map J*, 1(2), 65–72.
- Ita Purnami, K., Anom Jambe, A., & Wayan Wisaniyasa, N. (2018). Pengaruh Jenis Teh Terhadap Karakteristik Teh Kombucha. *Itepa: Jurnal Ilmu Dan Teknologi Pangan*, 7(2). <https://doi.org/10.24843/itepa.2018.v07.i02.p01>.
- Jayabalan, R., Marimuthu, S., & Swaminathan, K. (2007). Changes in content of organic acids and tea polyphenols during kombucha tea fermentation. *Food Chemistry*, 102(1). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.032>.
- Kovacs, Z., Bodor, Z., Zaukuu, J. L. Z., Kaszab, T., Bazar, G., Tóth, T., & Mohácsi-Farkas, C. (2020). Electronic nose for monitoring odor changes of Lactobacillus species during milk fermentation and rapid selection of probiotic candidates. *Foods*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/foods9111539>.
- Kruk, M., Trzaskowska, M., Ścibisz, I., & Pokorski, P. (2021). Application of the “scooby” and kombucha tea for the production of fermented milk drinks. *Microorganisms*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010123>.
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). Applied predictive modeling. In *Applied Predictive Modeling*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>.
- Kumar, S. D., Narayan, G., & Hassarajani, S. (2008). Determination of anionic minerals in black and kombucha tea using ion chromatography. *Food Chemistry*, 111(3). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.05.012>.
- Laavanya, D., Shirkole, S., & Balasubramanian, P. (2021). Current challenges, applications and future perspectives of SCOBY cellulose of Kombucha fermentation. In *Journal of Cleaner Production*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126454>.
- Laureys, D., Britton, S. J., & de Clippeleer, J. (2020). Kombucha Tea Fermentation: A Review. In *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 78(3). <https://doi.org/10.1080/03610470.2020.1734150>.
- Lazaro, J. B., Ballado, A., Bautista, F. P. F., So, J. K. B., & Villegas, J. M. J. (2018). Chemometric data analysis for black tea fermentation using principal component analysis. In *AIP Conference Proceedings* (p. 2045). <https://doi.org/10.1063/1.5080863>.
- Leal, J. M., Suárez, L. V., Jayabalan, R., Oros, J. H., & Escalante-Aburto, A. (2018). A review on health benefits of kombucha nutritional compounds and metabolites. *CYTA - Journal of Food*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1410499>.
- Li, Y.-X., Lai, H.-M., & Chen, C.-P. (2017). A Scientometric Review of the Current Status and Emerging Trends in Project-Based Learning. *International Journal of Information and Education Technology*, 7(8), 581–584. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2017.7.8.935>.
- Sanaeifar, A., Mohtasebi, S. S., Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Ahmadi, H. (2016). Application of MOS based electronic nose for the prediction of banana quality properties. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.041>.
- Saputri, R. K., Al-bari, A., Nahdlatul, U., Sunan, U., & Bojonegoro, G. (2020). Pengaruh Konsumsi Teh dengan Tingkat Obesitas Mahasiswa Farmasi Universitas Nahdlatul Ulama Sunan Gir. . *Jurnal Penjas Dan Farmasi*, 3.
- Seesaard, T., & Wongchoosuk, C. (2022). Recent Progress in Electronic Noses for Fermented Foods and Beverages Applications. *Fermentation*, 8(7), 302. <https://doi.org/10.3390/fermentation8070302>.
- Sharma, P., Ghosh, A., , Tudu, B., Sabhapondit, S., Baruah, B. D., Tamuly, P., Bhattacharyya, N., & Bandyopadhyay, R. (2015). Monitoring the fermentation process of black tea using QCM sensor based electronic nose. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.05.013>.
- Sharmilan, T., Premarathne, I., Wanniarachchi, I., Kumari, S., & Wanniarachchi, D. (2020). Electronic Nose Technologies in Monitoring Black Tea Manufacturing Process. In *Journal of Sensors*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/3073104>
- Sharmilan, T., Premarathne, I., Wanniarachchi, I., Kumari, S., & Wanniarachchi, D. (2022). Application of Electronic Nose to Predict the Optimum Fermentation Time for Low-Country Sri Lankan Tea. *Journal of Food Quality*. <https://doi.org/10.1155/2022/7703352>.
- Triyana, K., Taukhid Subekti, M., Aji, P., Nur Hidayat, S., & Rohman, A. (2015). Development of Electronic Nose with Low-Cost Dynamic Headspace for Classifying Vegetable Oils and Animal Fats. *Applied Mechanics and Materials*, 771. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.771.50>.
- Villarreal-Soto, S. A., Beaufort, S., Bouajila, J., Souchard, J. P., & Taillandier, P. (2018). Understanding

- Kombucha Tea Fermentation: A Review. In *Journal of Food Science*, 83(3), 580–588. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14068>.
- Wakhid, S., Sarno, R., & Sabilla, S. I. (2022). The effect of gas concentration on detection and classification of beef and pork mixtures using E-nose. *Computers and Electronics in Agriculture*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106838>.
- Wijaya, D. R., Sarno, R., & Zulaika, E. (2016). Sensor array optimization for mobile electronic nose: Wavelet transform and filter based feature selection approach. *International Review on Computers and Software*, 11(8). <https://doi.org/10.15866/irecos.v11i8.9425>.
- Wu, Q. J., Dong, Q. H., Sun, W. J., Huang, Y., Wang, Q. Q., & Zhou, W. L. (2014). Discrimination of Chinese teas with different fermentation degrees by stepwise linear discriminant analysis (S-LDA) of the chemical compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(38). <https://doi.org/10.1021/jf5025483>.
- Yu, D., & Gu, Y. (2021). A machine learning method for the fine-grained classification of green tea with geographical indication using a mos-based electronic nose. *Foods*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/foods10040795>.