

**KLASIFIKASI AROMA *VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS* (VOCS)
PADA TAPAI KETAN SELAMA PROSES FERMENTASI BERBASIS
*ELECTRONIC NOSE***

SKRIPSI

Oleh:
HISYAM JAUHAR ATHIF
NIM. 19640051



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**KLASIFIKASI AROMA *VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS* (VOCS)
PADA TAPAI KETAN SELAMA PROSES FERMENTASI BERBASIS
*ELECTRONIC NOSE***

SKRIPSI

**Diajukan kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Oleh:
HISYAM JAUHAR ATHIF
NIM. 19640051**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

KLASIFIKASI AROMA *VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS* (VOCs)
PADA TAPAI KETAN SELAMA PROSES FERMENTASI BERBASIS
ELECTRONIC NOSE

SKRIPSI

Oleh:
Hisyam Jauhar Athif
NIM. 19640051

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada Tanggal, 24 April 2026

Pembimbing I



Muthmainnah, M.Si.
NIP. 19860325 201903 2 009

Pembimbing II



Drs. H. Abdul Basid, M.Si.
NIP. 19650504 199003 1 003

Mengetahui,
Ketua Program Studi



Farid Samso Hananto, S.Si., M.T.
NIP. 19740513 200312 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

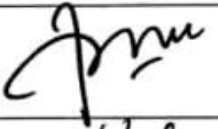
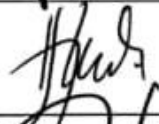
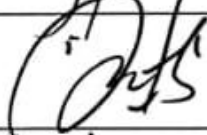
KLASIFIKASI AROMA *VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS* (VOCs) PADA TAPAI KETAN SELAMA PROSES FERMENTASI BERBASIS *ELECTRONIC NOSE*

SKRIPSI

Oleh:

Hisyam Jauhar Athif
NIM. 19640051

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal, 30 April 2026

Penguji Utama :	<u>Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T.</u> NIP. 19740513 200312 1 001	
Ketua Penguji :	<u>Naqiibatin Nadliriyah, M.Si.</u> NIP. 19920221 201903 2 020	
Sekretaris Penguji :	<u>Muthmainnah, M.Si.</u> NIP. 19860325 201903 2 009	
Anggota Penguji :	<u>Drs. H. Abdul Basid, M.Si.</u> NIP. 19650504 199003 1 003	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi


Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T.
NIP. 19740513 200312 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Hisyam Jauhar Athif
NIM : 19640051
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : Klasifikasi Aroma *Volatile Organic Compounds* (VOCs)
Pada Tapai Ketan Selama Proses Fermentasi Berbasis
Electronic Nose

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 24 April 2026
Yang Membuat Pernyataan



Hisyam Jauhar Athif
NIM. 19640051

MOTTO

"Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less." — Marie Curie

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya sederhana ini penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Ibunda dan Ayahanda yang tidak pernah berhenti mendoakan, mendukung, dan memberi kepercayaan kepada penulis. Terima kasih atas kasih sayang tiada batas dan pengorbanan yang tak ternilai.
2. Kakak penulis yang selalu memberi dukungan dan menjadi pendengar yang baik.
3. Keluarga besar penulis yang senantiasa memberikan dukungan moral dan keyakinan dalam menempuh perjalanan akademik ini.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Klasifikasi Aroma *Volatile Organic Compounds* (VOCs) Pada Tapai Ketan Selama Proses Fermentasi Berbasis *Electronic Nose*”. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun manusia menuju zaman *zakiyyah*, yakni *Addinul Islam Wal Iman*.

Penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah berpartisipasi dan membantu dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi. Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, S.Ag., M.Si., selaku Rektor UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. H. Agus Mulyono, S.Pd., M.Kes., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T., selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Muthmainnah, M.Si., selaku Dosen Pembimbing I yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan, motivasi dan meluangkan waktu untuk membimbing penulis selama proses penyusunan skripsi.
5. Drs. H. Abdul Basid, M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan integrasi Islam dan sains dalam skripsi.
6. Rusli, M.Si., selaku Dosen wali yang senantiasa memberikan bimbingan, pengarahan dan motivasi.
7. Segenap dosen, Laboran dan Admin Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang yang senantiasa memberikan pengarahan dan ilmu pengetahuan.
8. Orang tua, kakak, serta keluarga di rumah yang selalu memberi doa dan dukungan, baik moril maupun materiil selama proses penelitian.

9. Teman-teman Fisika angkatan 2019, khususnya peminatan Elektronika dan Instrumentasi yang senantiasa memberi semangat dan dukungan kepada penulis.
10. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dalam penulisan skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dan kekeliruan. Untuk itu, penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Demikian yang dapat penulis sampaikan, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menjadi sumbangsih dalam perkembangan ilmu pengetahuan.

Malang, 24 April 2026

Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
مستخلص البحث	xvii
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 6
2.1 Fermentasi dan Karakteristik Aroma Produk Pangan	6
2.2 Tapai Ketan	7
2.3 <i>Volatile Organic Compounds</i> (VOCs)	8
2.4 <i>Electronic Nose</i>	11
2.5 Sensor Gas	13
2.6 <i>Principal Component Analysis</i> (PCA)	15
2.7 <i>Software</i> Origin	16
2.8 Penelitian Relevan	18
 BAB III METODE PENELITIAN	 21
3.1 Jenis Penelitian	21
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.3 Alat dan Bahan	21
3.3.1 Alat Penelitian	21
3.3.2 Bahan Penelitian	22
3.4 Prosedur Penelitian	22
3.5 Perangkat <i>E-Nose</i>	23
3.5.1 Perangkat Keras (<i>Hardware</i>)	23
3.5.2 Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	23
3.6 Preparasi Sampel	23
3.7 Prosedur Pengambilan Data	24

3.8 Analisis Data	25
3.9 Data Hasil Pengukuran	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Hasil Pengujian Tapai Ketan	27
4.1.1 Preparasi Sampel Tapai Ketan	27
4.1.2 Prosedur Pengambilan Data Sampel Tapai Ketan	28
4.1.3 Hasil Pengambilan Data Sampel Tapai Ketan	28
4.2 Hasil Pengolahan Data Tapai Ketan dengan Metode PCA	29
4.2.1 Analisis Karakteristik <i>Sensor Array Melalui Scree Plot</i>	29
4.2.2 Analisis Karakteristik <i>Sensor Array Melalui Loading Plot</i>	33
4.2.3 Analisis Karakteristik <i>Sensor Array Melalui Score Plot 2D dan 3D</i>	38
4.3 Pola Aroma VOCs Tapai Ketan	46
4.4 Kajian Integrasi Islam dan Sains	52
BAB V PENUTUP.....	56
5.1 Kesimpulan	56
5.2 Saran	56
DAFTAR PUSTAKA.....	58
LAMPIRAN.....	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Korelasi antara penciuman manusia dengan penciuman buatan ..	12
Gambar 2.2	Sensor gas pada e-nose	14
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	22
Gambar 4.1	Preparasi sampel	27
Gambar 4.2	Proses pengambilan data pada sampel penelitian	28
Gambar 4.3	<i>Scree Plot</i> fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1	32
Gambar 4.4	<i>Scree Plot</i> fermentasi sampel tapai ketan hari ke-2	32
Gambar 4.5	<i>Scree Plot</i> fermentasi sampel tapai ketan hari ke-3	33
Gambar 4.6	<i>Scree Plot</i> fermentasi sampel tapai ketan hari ke-4	33
Gambar 4.7	<i>Loading Plot</i> fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1	34
Gambar 4.8	<i>Loading Plot</i> fermentasi sampel tapai ketan hari ke-2	35
Gambar 4.9	<i>Loading Plot</i> fermentasi sampel tapai ketan hari ke-3	35
Gambar 4.10	<i>Loading Plot</i> fermentasi sampel tapai ketan hari ke-4	36
Gambar 4.11	<i>Score Plot</i> 2D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1	39
Gambar 4.12	<i>Score Plot</i> 2D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-2	40
Gambar 4.13	<i>Score Plot</i> 2D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-3	40
Gambar 4.14	<i>Score Plot</i> 2D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-4	41
Gambar 4.15	<i>Score Plot</i> 3D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1	43
Gambar 4.16	<i>Score Plot</i> 3D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-2	43
Gambar 4.17	<i>Score Plot</i> 3D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-3	44
Gambar 4.18	<i>Score Plot</i> 3D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-4	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Profil senyawa volatil utama dalam fermentasi produk pangan	10
Tabel 2.2	Spesifikasi sensor-sensor gas	14
Tabel 3.1	Data hasil pengukuran sampel tapai ketan	25
Tabel 4.1	Variansi data sampel tapai ketan	29

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Skematik Rangkaian E-Nose	63
Lampiran 2 Pengambilan Data dengan <i>Software</i> Maliki Nose	64
Lampiran 3 Data Hasil Pengujian Tapai Ketan	65
Lampiran 4 Hasil Ekstraksi Fitur Data Pengujian Tapai Ketan.....	69

ABSTRAK

Athif, Hisyam Jauhar. 2026. **Klasifikasi Aroma *Volatile Organic Compounds* (VOCs) pada Tapai Ketan Selama Proses Fermentasi Berbasis *Electronic Nose***. Skripsi. Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Muthmainnah, M.Si. (II) Drs. H. Abdul Basid, M.Si.

Kata Kunci: *Volatile Organic Compounds, Electronic Nose, Principal Component Analysis*, Fermentasi, Tapai Ketan

Proses fermentasi tapai ketan menghasilkan senyawa volatil kompleks yang menentukan kualitas sensorik produk, namun pemantauan secara konvensional sering kali bersifat subjektif dan destruktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi aroma senyawa organik volatil (VOCs) pada tapai ketan menggunakan sistem *electronic nose* (e-nose). *Sensor array* dalam sistem e-nose ini terdiri dari enam sensor gas semikonduktor, yaitu MQ-3, MQ-4, MQ-136, MQ-137, TGS-822, dan TGS-2610. Sampel tapai ketan disiapkan dengan empat variasi konsentrasi ragi (0,5%; 1,0%; 1,5%; dan 2,0%) dan diamati selama empat hari proses fermentasi. Data respons sensor diolah menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa e-nose mampu menangkap dan membedakan pola aroma VOCs dari masing-masing sampel tapai ketan. Metode PCA mampu mengekstraksi informasi aroma VOCs secara efektif, di mana diperoleh nilai dua komponen utama pertama (PC1 dan PC2) dari setiap variasi durasi fermentasi sampel tapai ketan sebesar 99,19%; 96,58%; 94,82%; dan 93,28%. Visualisasi *Score Plot* 2D dan 3D menunjukkan pemisahan kluster yang jelas berdasarkan konsentrasi ragi pada sampel tapai ketan pada setiap durasi fermentasi. Hasil ini membuktikan bahwa integrasi e-nose dan PCA memiliki akurasi yang baik dalam mengklasifikasikan pola aroma VOCs tapai ketan, sehingga berpotensi diaplikasikan untuk pemantauan kualitas produk pangan hasil fermentasi secara objektif.

ABSTRACT

Athif, Hisyam Jauhar. 2026. **Classification of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Sticky Rice Tapai During Fermentation Using an Electronic Nose.** Undergraduate Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University, Malang. Advisor: (I) Muthmainnah, M.Si. (II) Drs. H. Abdul Basid, M.Si.

Keywords: Volatile Organic Compounds, Electronic Nose, Principal Component Analysis, Fermentation, Sticky Rice Tapai

The fermentation process of sticky rice tapai produces complex volatile compounds that determine the product's sensory quality; however, conventional monitoring methods are often subjective and destructive. This study aims to identify the aroma of volatile organic compounds (VOCs) in sticky rice tapai using an electronic nose (e-nose) system. The sensor array in this e-nose system consists of six semiconductor gas sensors: the MQ-3, MQ-4, MQ-136, MQ-137, TGS-822, and TGS-2610. Sticky rice tapai samples were prepared with four different yeast concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0%) and monitored throughout the four-day fermentation process. The sensor response data were analyzed using Principal Component Analysis (PCA). The results of the study show that the e-nose can detect and distinguish VOCs odor patterns in each sticky rice tapai sample. The PCA method effectively extracted aroma information from VOCs, yielding values for the first two principal components (PC1 and PC2) for each fermentation duration variation in the sticky rice tapai samples: 99.19%, 96.58%, 94.82%, and 93.28%. The 2D and 3D score plots clearly show the separation of clusters by yeast concentration in the sticky rice tapai samples at each fermentation duration. These results demonstrate that integrating an e-nose with PCA achieves high accuracy in classifying VOC aroma patterns in sticky rice tapai, making it a promising tool for the objective monitoring of the quality of fermented food products.

مستخلص البحث

عاطف، هشام جوهر. 2026. تصنيف المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) في أرز الدبق المخمر خلال عملية التخمير باستخدام الأنف الإلكتروني. البحث الجامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: مطمئنة، الماجستير؛ المشرف الثاني: الحاج عبد الباسط، الماجستير.

الكلمات الرئيسية: مركبات عضوية متطايرة، أنف إلكتروني، تحليل مكونات رئيسية، تخمير، أرز دبق مخمر.

تنتج عملية تخمير أرز الدبق المخمر مركبات متطايرة معقدة تحدد الجودة الحسية للمنتج، إلا أن الرصد بطرق تقليدية غالبًا ما يكون ذاتيًا وماحبًا. هدف هذا البحث إلى تحديد رائحة المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) في أرز الدبق المخمر باستخدام نظام الأنف الإلكتروني (*e-nose*). يتكون مصفوفة المستشعرات في نظام الأنف الإلكتروني من ستة مستشعرات غاز شبه موصلة وهي MQ-3، MQ-4، MQ-136، MQ-، TGS-822، و TGS-2610. تم إعداد عينات أرز الدبق المخمر بأربع تراكيزات مختلفة من الخميرة (0.5%؛ 1.0%؛ 1.5%؛ و 2.0%) وتمت مراقبتها على مدى أربعة أيام من عملية التخمير. تمت معالجة بيانات استجابة المستشعر باستخدام طريقة تحليل المكونات الرئيسية (PCA). أظهرت نتائج البحث أن الأنف الإلكتروني قادر على التقاط وتمييز نمط رائحة المركبات العضوية المتطايرة من كل عينة أرز الدبق المخمر. تستطيع طريقة PCA استخلاص معلومات الروائح من المركبات العضوية المتطايرة بفعالية، حيث تم الحصول على قيم المكونين الرئيسيين الأول والثاني (PC1 و PC2) لكل تغيير في مدة تخمير عينات أرز الدبق المخمر بنسبة 99.19% و 96.58% و 94.82% و 93.28% على التوالي. توضح تصورات مخطط النقاط ثنائي وثلاثي الأبعاد الفصل الواضح للمجموعات بناءً على تركيز الخميرة في عينات أرز الدبق المخمر عند كل فترة تخمير. تؤكد هذه النتائج أن دمج جهاز الأنف الإلكتروني (*e-nose*) مع PCA يمتلك دقة جيدة في تصنيف نمط روائح المركبات العضوية المتطايرة في أرز الدبق المخمر، مما يجعله قابلاً للتطبيق في مراقبة جودة المنتجات الغذائية المخمرة بشكل موضوعي.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tapai ketan merupakan salah satu produk bioteknologi konvensional yang populer di Indonesia, dibuat melalui proses fermentasi beras ketan (*Oryza sativa* L. var *glutinosa*), baik jenis ketan putih maupun ketan hitam. Produk ini memiliki karakteristik sensori yang unik, yaitu beraroma alkohol, sedikit asam, berasa manis, dan memiliki tekstur yang lunak akibat proses hidrolisis pati. Dalam pembuatannya, metode pemasakan beras ketan melalui perebusan maupun pengukusan memainkan peran penting karena memengaruhi tingkat gelatinisasi pati yang menjadi substrat bagi mikroba. Penelitian menunjukkan bahwa meskipun teknik pemasakan berbeda, karakteristik kimia seperti pH dan kadar gula reduksi pada produk akhir relatif stabil jika proses fermentasi terkontrol dengan baik (Marniza et al., 2020).

Mutu akhir dari tapai ketan sangat ditentukan oleh agen fermentasi yang diaplikasikan, yang lazim disebut sebagai ragi tapai. Di dalam *starter* tersebut terdapat kelompok mikroba yang bekerja secara sinergis. Kelompok kapang, seperti *Amylomyces rouxii* dan *Aspergillus* sp., bertugas menghidrolisis karbohidrat kompleks (pati) menjadi bentuk sakarida yang lebih sederhana. Selanjutnya, khamir jenis *Saccharomyces cerevisiae* akan melanjutkan proses metabolisme dengan mengonversi gula tersebut menjadi etanol beserta berbagai senyawa volatil pembentuk aroma. Konsentrasi ragi dan penambahan gula dalam proses pembuatan terbukti berpengaruh signifikan terhadap kadar air, kadar

alkohol, dan total gula reduksi pada tapai ketan. Variasi konsentrasi ini juga menentukan penerimaan organoleptik konsumen terhadap tekstur dan rasa tapai (Wahyuningsih et al., 2023).

Perkembangan teknologi sensor dan instrumentasi memungkinkan penggunaan *electronic nose* (e-nose) sebagai alternatif dalam analisis aroma produk pangan. E-nose adalah perangkat elektronik yang dibangun untuk meniru fungsi indra penciuman manusia. Perangkat ini akan mendeteksi bau atau aroma dan kemudian mengirimkan sinyal ke otak, mirip dengan sel-sel di dalam hidung manusia yang jumlahnya sangat banyak. Di dalam e-nose ini digunakan sejumlah sensor kimia yang diatur secara paralel yang berfungsi menggantikan sel-sel dalam hidung manusia (Tazi et al., 2018).

Pengembangan teknologi e-nose merupakan manifestasi nyata dari pemanfaatan potensi akal manusia sebagaimana diisyaratkan dalam Q.S. An-Nahl ayat 78:

وَاللَّهُ أَخْرَجَكُمْ مِنْ بُطُونِ أُمَّهَاتِكُمْ لَا تَعْلَمُونَ شَيْئًا وَجَعَلَ لَكُمُ السَّمْعَ وَالْأَبْصَارَ وَالْأَفْئِدَةَ ۖ لَعَلَّكُمْ تَشْكُرُونَ

Artinya: “Allah mengeluarkan kamu dari perut ibumu dalam keadaan tidak mengetahui sesuatu pun dan Dia menjadikan bagi kamu pendengaran, penglihatan, dan hati nurani agar kamu bersyukur.”

Berdasarkan ayat tersebut, Allah SWT menegaskan bahwa manusia dilahirkan dalam keadaan tanpa pengetahuan (*lā ta‘lamūna syai’ā*), namun dibekali dengan instrumen epistemologis berupa pendengaran, penglihatan, dan *al-af’idah* (akal/hati) untuk memproses informasi menjadi ilmu pengetahuan (Shihab, 2002). Secara integratif, penciptaan E-nose adalah hasil dari proses *al-af’idah* yang mentadaburi mekanisme biologis sistem olfaktori melalui

pendekatan biomimikri. Para ilmuwan menggunakan akalnya untuk meniru cara kerja reseptor hidung biologis dan menerjemahkannya menjadi deretan sensor (*sensor array*) gas berbasis kecerdasan buatan untuk mendeteksi pola aroma secara digital (Karakaya et al., 2020). Inovasi ini bukan sekadar pencapaian rekayasa teknologi, melainkan bentuk aktualisasi rasa syukur (*la'allakum tasykurūn*) yang fungsional. Syukur dalam konteks sains modern dimaknai sebagai penggunaan teknologi untuk kemaslahatan umat, seperti penerapan e-nose untuk identifikasi kehalalan produk pangan (mendeteksi pemalsuan daging atau kandungan alkohol), yang sejalan dengan prinsip syariah untuk mengonsumsi makanan dan minuman yang *halalan thayyiban* (Wakhid et al., 2022).

Karakterisasi aroma dengan metode non-invasif seperti hidung elektronik (e-nose) semakin banyak diterapkan dalam penelitian pangan di Indonesia. Hidung elektronik berbasis sensor gas MOS mampu menangkap pola respon terhadap campuran *volatile organic compounds* (VOCs) dalam sampel makanan dan telah digunakan pada berbagai produk, seperti pada madu, buah, hingga produk fermentasi dengan hasil klasifikasi yang memadai. Sistem instrumentasi ini memiliki kelebihan dari sisi kecepatan, biaya relatif rendah, dan kemudahan integrasi untuk pengujian berulang (Shiddiq et al., 2021).

Implementasi e-nose dapat menjadi sebuah metode objektif untuk melacak dan menganalisis perubahan pola aroma volatil pada tapai ketan selama masa fermentasi. Pada penelitian ini akan digunakan sensor gas dengan tipe MQ dan TGS. Dengan memanfaatkan analisis statistik seperti *Principal Component Analysis* (PCA), pola respon dari sensor tersebut dapat diproses menjadi visualisasi data yang menunjukkan perbedaan karakteristik aroma antar sampel.

Data yang diperoleh dari analisis ini diharapkan dapat menyumbangkan informasi ilmiah dan membuka jalan bagi penerapan teknologi sensor dalam pengawasan mutu produk pangan fermentasi tradisional lainnya.

1.2 Rumusan Masalah

Merujuk pada uraian latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana identifikasi pola aroma VOCs pada tapai ketan selama proses fermentasi dengan metode PCA?
2. Bagaimana efektivitas penerapan metode PCA dalam klasifikasi perubahan aroma VOCs pada tapai ketan selama proses fermentasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Merujuk pada rumusan masalah di atas, maka tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengidentifikasi pola aroma VOCs pada tapai ketan selama proses fermentasi dengan metode PCA.
2. Untuk mengetahui efektivitas penerapan metode PCA dalam klasifikasi perubahan aroma VOCs pada tapai ketan selama proses fermentasi.

1.4 Batasan Masalah

Adapun pembatasan ruang lingkup yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Bahan baku beras ketan yang digunakan untuk membuat sampel tapai ketan adalah beras ketan putih.
2. Variasi dosis ragi dalam sampel tapai ketan yaitu 0,5%; 1,0%; 1,5%; dan 2,0% (b/b).
3. Pengujian sampel menggunakan alat hidung elektronik yang telah tersedia yang terdiri dari enam sensor gas bertipe MQ dan TGS.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu:

1. Manfaat ilmiah: memberikan informasi ilmiah mengenai perubahan pola aroma tapai ketan selama proses fermentasi dan penerapan teknologi e-nose dalam analisis aroma produk fermentasi.
2. Manfaat praktis: memberikan alternatif metode penilaian mutu tapai ketan yang lebih objektif, cepat, dan terukur dibandingkan uji sensori manusia.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fermentasi dan Karakteristik Aroma Produk Pangan

Fermentasi adalah suatu proses bioteknologi yang melibatkan konversi bahan pangan melalui aktivitas mikroorganisme, seperti bakteri, ragi, dan kapang. Proses ini tidak hanya bertujuan meningkatkan keamanan serta umur simpan bahan makanan, tetapi juga mempengaruhi komposisi kimia yang berperan dalam aspek sensorik seperti aroma, rasa, dan tekstur. Fermentasi memegang peranan penting dalam pembuatan berbagai produk makanan, baik yang bersifat tradisional maupun modern, karena kemampuannya dalam meningkatkan nilai gizi serta karakteristik sensorik dari produk akhir (Pawestri, Pertiwi & Perdhana, 2025).

Karakteristik aroma pada produk fermentasi sebagian besar ditentukan oleh senyawa organik volatil yang terbentuk atau mengalami modifikasi selama proses fermentasi berlangsung. Karakteristik aroma ini dibentuk secara esensial oleh berbagai kelompok senyawa organik, mulai dari ester, keton, alkohol, aldehida, asam organik, hingga senyawa sulfur yang mayoritas merupakan produk turunan dari aktivitas perombakan karbohidrat, lemak (lipid), serta protein. Variasi komposisi dan konsentrasi dari senyawa-senyawa tersebut yang mendefinisikan identitas aroma yang khas pada setiap produk fermentasi (Vázquez-Araújo, L., 2023).

Perbedaan komposisi senyawa volatil sangat dipengaruhi oleh keragaman spesies dan *strain* mikroba yang terlibat. Di sisi lain, faktor eksternal seperti suhu,

pH, ketersediaan oksigen, dan lama waktu fermentasi berperan dalam mengatur laju pembentukan senyawa tersebut. Profil aroma yang khas merupakan manifestasi dari kombinasi antara aktivitas biologis mikroba dan kondisi lingkungan fermentasinya (Dzialo et al., 2017).

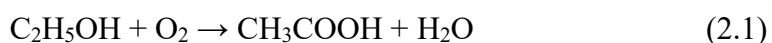
2.2 Tapai Ketan

Secara historis, tapai ketan atau *fermented glutinous rice* dikenal sebagai salah satu produk bioteknologi pangan paling awal yang tumbuh dan berkembang dalam tradisi kuliner masyarakat Austronesia. Produk ini ditemukan dan dikonsumsi secara luas di berbagai wilayah, mulai dari Indonesia dan Malaysia hingga Thailand, di mana tapai ketan dikenal dengan sebutan *khao-mak*. Meskipun waktu dan tempat awal kemunculan teknik pembuatannya tidak dapat ditentukan secara pasti, karena berkembang melalui pengetahuan lokal yang diwariskan secara turun-temurun secara lisan, tapai ketan diyakini muncul dari praktik masyarakat agraris dalam memanfaatkan ragi alami untuk mengawetkan kelebihan hasil panen beras ketan (Tamang et al., 2016).

Tapai ketan tidak lagi hanya berfungsi sebagai produk hasil pengawetan pangan, tetapi telah berkembang menjadi bagian dari tradisi budaya yang sarat makna terutama di wilayah Pulau Jawa dan Bali. Makanan ini sering dihadirkan sebagai sajian khas dalam berbagai perayaan keagamaan, seperti Hari Raya Idul Fitri, maupun dalam rangkaian upacara adat, termasuk prosesi pernikahan, sebagai simbol kehangatan, kebersamaan, serta bentuk penghormatan dan keramahan tuan rumah kepada para tamu (Nuraida, 2019).

Proses fermentasi pada tapai ketan merupakan rangkaian reaksi biokimia dinamis yang melibatkan suksesi ekologis antara kapang, khamir, dan bakteri.

Pada tahap awal, aktivitas amilolitik mendominasi dimana pati dihidrolisis menjadi gula sederhana, memberikan rasa manis yang diinginkan. Namun, jika inkubasi dilanjutkan melampaui waktu optimum (biasanya 48–72 jam), produk akan memasuki fase fermentasi lanjut. Pada fase ini, khamir *Saccharomyces cerevisiae* yang telah mengubah gula menjadi etanol akan mengalami penurunan aktivitas, dan bakteri asam asetat (*Acetobacter* sp.) yang mengambil peran dominan jika terdapat paparan oksigen. Melalui mekanisme fermentasi secara oksidatif, kelompok bakteri tersebut berperan dalam mengonversi etanol menjadi asam asetat atau cuka. Secara kimiawi, proses transformasi ini dapat digambarkan melalui persamaan reaksi di bawah ini (Barus & Wijaya, 2020):



Akumulasi asam asetat inilah yang menyebabkan penurunan pH secara drastis dan memunculkan rasa masam yang tajam serta aroma menyengat, yang mengindikasikan penurunan mutu organoleptik produk (Simbolon et al., 2022). Selain asam asetat, fermentasi lanjut yang tidak terkontrol juga dapat memicu pembentukan senyawa ester berlebih yang mengubah profil *volatile compound* dari aroma khas alkoholik menjadi aroma tengik atau terlalu asam, yang dapat dideteksi sebagai parameter kerusakan pangan (Widyaningrum & Nugroho, 2021).

2.3 Volatile Organic Compounds (VOCs)

Volatile Organic Compounds (VOCs) merupakan sekumpulan molekul organik yang memiliki sifat mudah bertransisi ke fase gas pada temperatur ruang, sehingga memegang peranan penting dalam membentuk profil aroma khas dari suatu material. Secara kimia VOCs terdiri dari alkohol, aldehida, keton, ester,

asam organik, hidrokarbon aromatik, yang memiliki sifat volatilitas dan keragamannya membuat VOCs menjadi penentu utama profil aroma pada makanan maupun bau di lingkungan. Pengukuran dan karakterisasi VOCs diperlukan karena selain fungsi sensorik (*flavour/odor*) beberapa komponen VOCs juga berdampak pada kesehatan dan kualitas produk (Rajendran, Silcock, & Bremer, 2023).

Alkohol dan ester merupakan kelompok senyawa volatil yang sering mendominasi aroma produk fermentasi. Alkohol umumnya dihasilkan melalui fermentasi karbohidrat oleh khamir, sedangkan ester terbentuk dari reaksi antara alkohol dan asam organik yang dikatalisis oleh enzim mikroba. Ester dikenal memberikan aroma buah dan manis yang menyenangkan, sehingga berkontribusi besar terhadap penerimaan sensorik. Sementara itu, aldehid dan keton dapat memberikan nuansa aroma segar, tajam, atau khas tergantung pada jenis dan konsentrasinya (Dzialo et al., 2017).

Tinjauan kimia-fisik mendefinisikan aroma sebagai gabungan dari senyawa organik volatil (VOCs), yakni molekul kimia yang memiliki tekanan uap tinggi pada suhu ruang sehingga mudah menguap dan berdifusi melalui udara. Eksistensi materiil dari VOCs ini secara implisit terdapat di dalam Q.S. Yusuf ayat 94:

وَلَمَّا فَصَلَتِ الْعِيرُ قَالَ أَبُوهُمْ إِنِّي لَأَجِدُ رِيحَ يُوسُفَ لَوْلَا أَنْ تُفَنِّدُونِ

Artinya: *Ketika kafilah itu telah keluar (dari Mesir dan memasuki Palestina), ayah mereka berkata, “Sesungguhnya aku mencium bau Yusuf seandainya kamu tidak menuduhku lemah akal.”*

Nabi Yaqub A.S. mampu mendeteksi keberadaan putranya melalui aroma jubahnya yang terbawa angin (*rih*). Tafsir Ilmi modern memandang peristiwa ini

sebagai bukti bahwa aroma bukanlah fenomena mistis, melainkan perpindahan massa (*mass transfer*) zat kimia yang spesifik dan terukur (Huda & Mulyadi, 2021). Setiap individu atau bahan organik melepaskan profil VOCs unik yang dalam sains disebut sebagai *biomarker*. Hidung Nabi Yaqub A.S. berfungsi sebagai detektor biologis yang sangat sensitif terhadap *biomarker* spesifik tersebut, sebagaimana mekanisme yang saat ini diadopsi di dalam teknologi e-nose. E-nose bekerja dengan menangkap pola unik VOCs yang dilepaskan sampel, lalu mengonversinya menjadi data digital untuk identifikasi kualitas atau keaslian produk, selaras dengan prinsip pembuktian kebenaran (*tabayyun*) berbasis bukti fisik yang diisyaratkan dalam ayat tersebut (Sanaeifar et al., 2017).

Keberadaan dan intensitas senyawa volatil tidak hanya menentukan karakter aroma, tetapi juga mencerminkan kondisi proses fermentasi. Perubahan komposisi senyawa volatil selama fermentasi dapat digunakan sebagai indikator dinamika aktivitas mikroorganisme, tingkat kematangan fermentasi, serta kemungkinan terjadinya penyimpangan proses. Oleh karena itu, analisis senyawa volatil banyak dimanfaatkan dalam evaluasi kualitas dan pengendalian mutu produk pangan fermentasi (Yang et al., 2019).

Tabel 2.1 Profil senyawa volatil utama dalam fermentasi produk pangan (sumber: (a) Zhang et al. (2020); (b) Liu et al. (2020); (c) Xu et al. (2018); (d) Lyu et al. (2019)).

Kelompok / Senyawa	Deskripsi Aroma & Peran dalam Fermentasi	Ref.
Alkohol		
<i>Ethanol</i>	Aroma alkoholik, hangat, sedikit manis. Merupakan produk utama fermentasi khamir yang menandakan kematangan.	(a), (c)
<i>3-Methyl-1-butanol</i>	Aroma <i>fruity</i> , <i>malty</i> , atau pisang. Dikenal sebagai <i>fusel oil</i> , memberikan kompleksitas rasa.	(a), (b)

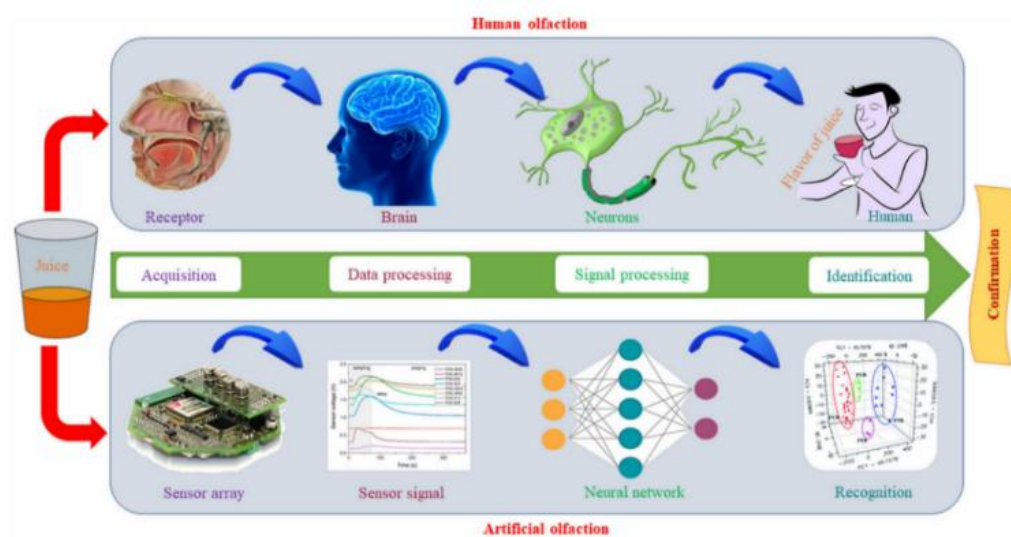
<i>2-Phenylethanol</i>	Aroma bunga mawar (<i>floral</i>) dan madu. Memberikan nuansa harum.	(a), (d)
Ester		
<i>Ethyl Acetate</i>	Aroma nanas/buah, manis. Jika berlebih berbau seperti pelarut/lem (indikasi fermentasi berlebih).	(b), (c)
<i>Isoamyl Acetate</i>	Aroma pisang (<i>banana</i>) yang kuat. Memberikan karakter aroma buah.	(a)
Asam Organik		
<i>Acetic Acid</i>	Aroma cuka, tajam, menyengat. Indikator utama oksidasi alkohol (kerusakan/terlalu asam).	(b), (d)
<i>Butanoic Acid</i>	Aroma tengik (<i>rancid</i>) atau keju busuk. Muncul akibat kontaminasi atau sanitasi buruk.	(b)

2.4 Electronic Nose (E-Nose)

E-nose (hidung elektronik) adalah sistem deteksi aroma yang dirancang untuk mereplikasi mekanisme penciuman manusia dengan menggunakan susunan sensor gas sebagai pengganti reseptor biologis. Kumpulan sensor ini, yang dikenal sebagai larik sensor, memberikan karakteristik unik pada setiap perangkat tergantung pada tujuan penggunaan dan target aroma yang dideteksi. Pada masa kini, perancangan sistem e-nose yang hemat biaya menjadi jauh lebih mudah untuk direalisasikan. Hal ini didukung oleh melimpahnya sensor tipe *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) berskala komersial dengan harga yang relatif murah, contohnya seperti MQ dan TGS. Hadirnya komponen tersebut dalam wujud modul instan sangat membantu dalam mengefisiensikan waktu dan kerumitan tahap perakitan sistem (Shiddiq et al., 2021).

E-nose bekerja seperti hidung manusia. Hidung manusia memiliki kemampuan dalam mengenali dan mendeteksi berbagai aroma dan bau yang ada di lingkungan sekitar. Pada bagian atas saluran hidung terdapat jaringan khusus yang disebut dengan epitel olfaktori. Epitel olfaktori memiliki ribuan reseptor bau

yang peka terhadap berbagai zat kimia dalam molekul bau. Ketika molekul-molekul bau masuk ke hidung, mereka berinteraksi dengan reseptor bau pada epitel olfaktori. Setiap reseptor bau spesifik untuk jenis bau tertentu, dan ketika molekul bau terikat pada reseptor pada reseptor yang cocok, sinyal bau dikirim melalui impuls saraf ke otak. Di otak, sinyal-sinyal bau ini diinterpretasikan dan diolah, sehingga kita dapat mengenali dan membedakan berbagai aroma (Sanjaya et al., 2024).



Gambar 2.1 Korelasi antara penciuman manusia dengan penciuman buatan (Roy & Yadav, 2022)

Fungsi reseptor biologis digantikan oleh susunan sensor kimia seperti tipe MQ yang dirangkai secara paralel dalam sistem hidung elektronik. Setiap sensor dalam tipe ini memiliki karakteristik sensitivitas yang spesifik terhadap berbagai jenis gas. Prinsip kerja sensor tersebut didasarkan pada interaksi atom, molekul, atau ion pada permukaan sensor, yang selanjutnya ditransduksi menjadi sinyal listrik (Muthmainnah et al., 2020).

E-nose telah digunakan secara luas untuk berbagai aplikasi, salah satunya dalam teknologi pangan seperti penilaian mutu, deteksi pembusukan, identifikasi

produk, dan pemantauan proses fermentasi. Sistem ini mampu membedakan produk berdasarkan jenis bahan baku, metode pengolahan, serta tahap fermentasi melalui analisis pola aroma yang dihasilkan (Chen et al., 2018). Pada produk pangan fermentasi, hidung elektronik berperan sebagai alat pemantauan non-destruktif yang dapat mendeteksi perubahan aroma secara *real-time*. Kemampuan ini menjadikan hidung elektronik sebagai alternatif untuk menggantikan atau melengkapi uji sensorik konvensional, khususnya dalam aplikasi yang memerlukan konsistensi dan kecepatan analisis.

2.5 Sensor Gas

Sensor gas merupakan perangkat transduser yang berfungsi mengubah informasi kimia, berupa keberadaan dan konsentrasi gas tertentu, menjadi sinyal analitik yang dapat diukur secara kuantitatif. Dalam satu dekade terakhir, pengembangan teknologi sensor gas telah menjadi fokus penelitian yang intensif seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan pemantauan kualitas udara, keselamatan industri, serta diagnosis medis non-invasif. Prinsip kerja dasar dari mayoritas sensor gas modern didasarkan pada interaksi fisikokimia antara molekul gas target dengan permukaan material *sensing*. Interaksi ini memicu perubahan sifat fisik material, seperti perubahan resistansi, kapasitansi, atau frekuensi resonansi, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik (Dey, 2018).

Berbagai jenis material sensor telah tersedia di pasaran, sensor berbasis *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) merupakan varian yang paling dominan digunakan dalam aplikasi komersial dan industri. Sensor MOS secara umum menggunakan material seperti timah dioksida (SnO_2) atau seng oksida (ZnO)

dikarenakan biaya fabrikasinya yang rendah serta sensitivitas yang tinggi terhadap berbagai jenis gas. Mekanisme deteksi pada sensor ini bergantung pada reaksi reduksi-oksidasi (redoks) pada permukaan oksida logam yang dipanaskan. Ketika gas target berinteraksi dengan oksigen yang teradsorpsi di permukaan sensor, terjadi perubahan densitas elektron yang secara langsung mengubah konduktivitas listrik material tersebut (Wang et al., 2020).

Meskipun sensor MOS memiliki sensitivitas yang unggul, tantangan utama yang sering dihadapi adalah selektivitas yang rendah, dimana sensor cenderung merespons berbagai gas sekaligus (*cross-sensitivity*). Untuk mengatasi keterbatasan ini, salah satu pendekatan yang dilakukan yaitu dengan pengembangan hidung elektronik (e-nose). Sistem ini mengintegrasikan larik sensor (*sensor array*) yang terdiri dari beberapa sensor dengan karakteristik berbeda dan menggunakan algoritma pengenalan pola (*pattern recognition*) berbasis kecerdasan buatan. Kombinasi ini memungkinkan identifikasi campuran gas yang kompleks dengan akurasi tinggi, yang kini diaplikasikan luas mulai dari deteksi kebusukan pangan hingga pemantauan lingkungan (Karakaya et al., 2020).

Sensor gas yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari:



MQ 3



MQ 136



MQ 4



TGS 822



MQ 137



TGS 2610

Gambar 2.2 Sensor gas pada e-nose

Tabel 2.2 Spesifikasi sensor-sensor gas (*Datasheet*: Figaro dan Winsen)

Sensor	Gas Target Sensitif	Fungsi Utama	Jangkauan Deteksi
MQ-3	Alkohol	Deteksi Alkohol	25 ppm–500 ppm
MQ-4	Metana	Deteksi Metana dan Gas Alam	200–10000 ppm
MQ-136	Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	Deteksi Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	1–100 ppm
MQ-137	Amonia (NH ₃)	Deteksi Amonia (NH ₃)	5–500 ppm
TGS-822	Uap Pelarut Organik	Deteksi Uap Pelarut Organik	50–5000 ppm
TGS-2610	Propana, Butana	Deteksi LP Gas (LPG) Spesifik	500–10000 ppm

2.6 Principal Component Analysis (PCA)

Sebagai salah satu metode analisis statistik multivariat, PCA difungsikan untuk memadatkan dimensi kumpulan data tanpa mengorbankan informasi penting di dalamnya. Secara operasional, algoritma ini bekerja dengan melakukan transformasi linear untuk mengonversi variabel-variabel awal yang saling berhubungan menjadi sekumpulan variabel baru yang saling bebas (ortogonal), yang dinamakan sebagai komponen utama (*principal components*). Karena kemampuannya dalam menyederhanakan kompleksitas data tanpa mengorbankan varians informasi, PCA menjadi metode standar dalam pengolahan data

berdimensi tinggi, seperti pada analisis respons *array* sensor (Jolliffe & Cadima, 2016).

Secara matematis, metode PCA dibangun melalui analisis matriks kovarians atau korelasi untuk mengidentifikasi arah penyebaran data yang paling dominan. Komponen utama pertama (PC1) dibentuk untuk menangkap variansi terbesar, sementara komponen-komponen selanjutnya (PC2, PC3, dan seterusnya) diarahkan untuk menyerap sisa variansi maksimum dengan syarat harus saling tegak lurus (ortogonal) terhadap komponen sebelumnya. Komponen-komponen ini diturunkan dari perhitungan *eigenvector* dan *eigenvalue*. Nilai *eigenvalue* tersebut berfungsi sebagai indikator kuantitatif yang menunjukkan seberapa besar kontribusi setiap komponen dalam menjelaskan total variansi data (Abdi & Williams, 2017).

Selain reduksi dimensi, PCA juga dimanfaatkan sebagai teknik diagnostik dalam analisis data eksploratif. Kemampuannya dalam memvisualisasikan struktur global data memudahkan deteksi dini terhadap *outliers* dan tendensi data. Oleh karena itu, dalam penelitian berbasis sensor gas atau aroma, plot PCA sering digunakan sebagai tolok ukur pertama untuk memverifikasi kemampuan klasifikasi dari sampel uji oleh *array* sensor sebelum dilakukan pemodelan klasifikasi lebih lanjut (Brereton & Lloyd, 2016).

2.7 Software Origin

Software Origin merupakan perangkat lunak analisis data dan visualisasi ilmiah yang banyak digunakan dalam bidang sains dan teknik. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh OriginLab Corporation dan dirancang untuk memudahkan

peneliti dalam mengolah data numerik, melakukan analisis statistik, dan menyajikan hasil dalam bentuk grafik ilmiah yang informatif. Origin banyak digunakan pada penelitian eksperimental karena kemampuannya menangani data berdimensi besar secara efisien dan fleksibel (OriginLab Corporation, 2016).

Origin memiliki kapabilitas pengolahan data yang luas, mulai dari analisis dasar hingga kompleks seperti analisis spektral. Keunggulan terletak pada kemudahan akses terhadap analisis multivariat, termasuk PCA, sehingga memungkinkan peneliti untuk menyederhanakan struktur data dengan dimensi tinggi guna mendapatkan intisari informasi dari hasil pengujian. Origin juga terintegrasi dengan berbagai format data dan perangkat lunak lain, sehingga cocok digunakan dalam penelitian eksperimental yang melibatkan akuisisi data berulang. Fleksibilitas ini menjadikan Origin sebagai perangkat lunak yang efektif untuk analisis data sensor dan interpretasi hasil penelitian secara kuantitatif (Roy, et al., 2021).

Kemampuan Origin dalam visualisasi data menjadi salah satu alasan utama penggunaannya dalam penelitian ilmiah. *Software* ini menawarkan berbagai pilihan grafik dua dan tiga dimensi dengan kualitas yang layak untuk publikasi, serta fitur kustomisasi yang lengkap. Dalam penelitian yang melibatkan sensor, seperti e-nose, visualisasi PCA menggunakan Origin memudahkan peneliti untuk melihat pemisahan dan kesamaan pola respons sensor antar sampel secara lebih jelas dan terstruktur (Chen, et al., 2018).

2.8 Penelitian Relevan

Sebagai acuan komparatif dan landasan teoretis, penelitian ini merujuk pada sejumlah kajian terdahulu yang memiliki keterkaitan fokus dengan rancangan penelitian, diantaranya adalah penelitian Shtepliuk et al. (2025) berjudul “*Electronic nose and machine learning for modern meat inspection*”, dalam penelitian ini dilakukan eksperimen menggunakan sistem e-nose untuk mengukur emisi VOC dari sampel daging babi. Sampel terdiri atas daging segar dan daging yang dikontaminasi urin, serta sampel dengan variasi umur simpan. Sistem e-nose yang dikombinasikan dengan model *Optimizable Ensemble* mampu membedakan daging segar dan daging yang terkontaminasi urin dengan akurasi uji sebesar 96,3%, sensitivitas 96,5%, dan spesifisitas 95,3%. Model juga mampu membedakan daging segar dan daging yang telah disimpan 1–2 hari dengan akurasi 93,5%. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi e-nose dan *machine learning* efektif untuk inspeksi mutu daging dan deteksi kontaminasi berbasis pola VOC.

Penelitian Shiddiq et al. (2021) berjudul “Rancang Bangun Sistem Hidung Elektronik Berbasis Sensor Gas MQ untuk Mengevaluasi Kualitas Madu”, dalam penelitian ini dilakukan eksperimen dengan merancang dan membangun sistem e-nose dengan enam sensor gas MOS seri MQ. Data berupa tegangan keluaran sensor terhadap waktu direkam menggunakan Arduino, PLX-DAQ, dan diolah menggunakan Python. Sensor MQ 3, MQ 4, dan MQ 6 menunjukkan respon paling tinggi terhadap aroma sampel. Sistem e-nose mampu membedakan madu hutan, madu SNI, dan sari kurma (non-madu). Nilai luas trapezoid tertinggi diperoleh pada madu SNI, diikuti madu hutan, dan terendah pada sari kurma.

Sensor MQ-6 dinilai paling baik dalam membedakan ketiga jenis sampel, serta respon sensor berkaitan dengan kadar gula dan nilai pH sampel.

Penelitian Zheng et al. (2022) berjudul “*Volatile Organic Compounds, Evaluation Methods and Processing Properties for Cooked Rice Flavor*”, dalam penelitian ini dilakukan *literature review* terhadap penelitian lima tahun terakhir mengenai aroma nasi matang. *Review* ini menyimpulkan bahwa aroma nasi matang tersusun oleh lebih dari 300 senyawa volatil, dengan kelompok utama berupa aldehid, alkohol, keton, asam, ester, dan senyawa heterosiklik. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa metode instrumentasi seperti GC-MS dan e-nose berbasis sensor MOS, dikombinasikan dengan analisis pola (misalnya PCA, LDA, dan jaringan saraf), mampu membedakan varietas beras dan kondisi pengolahan berdasarkan pola VOC. Selain itu, faktor proses (suhu, tekanan, waktu memasak, dan kondisi pascapanen) berpengaruh kuat terhadap profil VOC nasi matang.

Penelitian Muthmainnah et al. (2020) berjudul “Analisis Kandungan Minyak Babi Pada Minyak Kanola Melalui Klasifikasi Pola Hidung Elektronik (e-nose) Berbasis Linear Discriminant Analysis (LDA)”, dalam penelitian ini dilakukan eksperimen menggunakan sistem e-nose berbasis 10 sensor semikonduktor yang dirangkai paralel. Objek uji dalam penelitian tersebut meliputi tiga variasi, yakni minyak kanola utuh, minyak babi 100%, serta formulasi campuran keduanya dengan rasio berimbang (50:50). Melalui analisis *Linear Discriminant Analysis* (LDA), visualisasi *score plot* memperlihatkan pemisahan kelompok yang sangat tegas di antara ketiga varian sampel tersebut. Tingkat akurasi pemisahan ini didukung oleh nilai Fungsi Diskriminan 1 (FD1) yang mencapai 99,9% dan Fungsi Diskriminan 2 (FD2) senilai 0,1%. Temuan ini

mengonfirmasi keandalan instrumen e-nose dalam mengidentifikasi secara presisi antara minyak nabati yang terbebas dari unsur babi dengan minyak yang telah terkontaminasi lemak babi.

Penelitian Feng et al. (2021) berjudul “*Real-time and on-line monitoring of ethanol fermentation process by viable cell sensor and electronic nose*”, dalam penelitian ini dilakukan eksperimen skala bioreaktor 5-L pada fermentasi etanol oleh *Saccharomyces cerevisiae*. Nilai kapasitansi memiliki korelasi sangat tinggi dengan jumlah sel hidup (CFU) dengan $R^2 = 0,996$. Konsentrasi etanol yang diukur oleh e-nose menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan HPLC (koefisien korelasi hingga 0,999). Penerapan strategi *feeding* glukosa berbasis sensor *online* meningkatkan konsentrasi etanol sebesar 15,4%, produktivitas 15,9%, dan rendemen 9,0% dibandingkan proses kontrol. Hasil ini membuktikan bahwa e-nose efektif digunakan untuk pemantauan etanol secara *real-time* dan *online* pada proses fermentasi.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Secara metodologis, penelitian ini diklasifikasikan ke dalam jenis penelitian eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Pada penelitian ini digunakan *array* berbasis sensor gas dalam rangkaian e-nose, yang berfungsi sebagai pendeteksi pola senyawa volatil dari sampel tapai ketan dengan *output* berupa data numerik yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode statistik.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Rangkaian kegiatan eksperimen dalam penelitian ini mulai dilaksanakan pada bulan Februari 2026. Adapun seluruh tahapan pengujian dan pengambilan data difokuskan di dua laboratorium utama, yakni Laboratorium Sensor dan Laboratorium Termodinamika, yang berada di Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat Penelitian

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- a. Sistem e-nose dengan Arduino Nano dan enam buah sensor gas (MQ-3, MQ-4, MQ-136, MQ-137, TGS-822, dan TGS 2610)
- b. Neraca digital
- c. Mortar dan Pestle
- d. *Beaker glass*

- e. Termometer
- f. Wadah plastik dengan penutup
- g. *Aluminium foil*

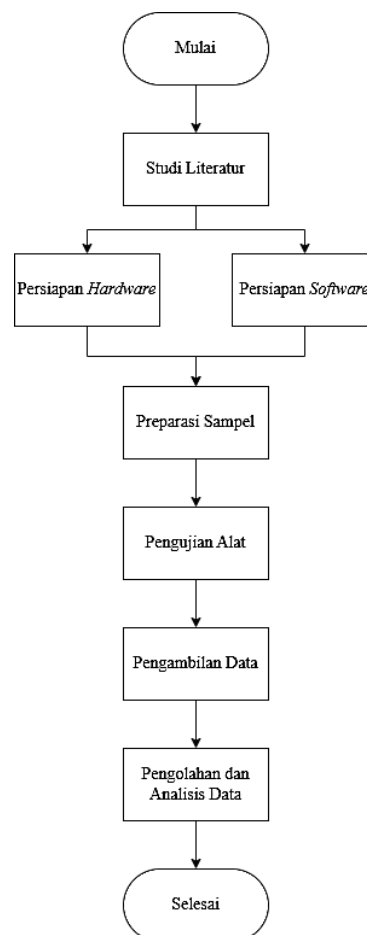
3.3.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- a. Beras ketan putih
- b. Ragi

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian dijelaskan dengan diagram alir penelitian sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.5 Perangkat E-Nose

3.5.1 Perangkat Keras (*Hardware*)

Adapun *hardware* yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. Sistem e-nose dengan sensor gas: MQ-3, MQ-4, MQ-136, MQ-137, TGS-822, dan TGS-2610 yang digunakan untuk mendeteksi pola aroma dari sampel uji.
- b. Arduino Nano yang digunakan sebagai mikrokontroler dalam rangkaian alat.
- c. Laptop yang digunakan untuk mengolah data penelitian.

3.5.2 Perangkat Lunak (*Software*)

Adapun *software* yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. *Software* Maliki Nose yang digunakan untuk menjalankan program dari rangkaian e-nose.
- b. *Software* Origin yang digunakan untuk mengklasifikasi data hasil pengukuran.

3.6 Preparasi Sampel

Adapun preparasi sampel dalam penelitian ini dijelaskan dalam tahapan-tahapan berikut:

- a. Tahap Pencucian dan Perendaman

Pada tahap preparasi sampel, bahan baku berupa beras ketan putih ditakar massanya sebesar 500 gram. Proses dilanjutkan dengan tahap pencucian melalui tiga kali siklus pembilasan guna memastikan kebersihannya. Setelah itu, ketan mengalami proses perendaman (hidrasi) menggunakan air di dalam kontainer plastik yang higienis, dan dibiarkan pada kondisi

suhu lingkungan (suhu ruang) selama kurun waktu delapan jam. Dari tahapan ini, butir beras ketan putih akan terhidrasi yang mempermudah proses glutinasi.

b. Tahap Pengukusan

Setelah tahap perendaman dilanjutkan dengan tahapan pengukusan hingga matang. Tahapan termal berupa pengukusan ini diimplementasikan dalam dua siklus berurutan. Langkah tersebut memiliki fungsi yakni untuk melunakkan fisik beras ketan sekaligus bertindak sebagai proses sterilisasi guna mengeliminasi potensi kontaminasi mikroorganisme patogen.

c. Tahap Peragian

Setelah tahap pengukusan dilanjutkan dengan tahapan peragian dengan menggunakan ragi yang telah dihaluskan dengan variasi konsentrasi 0,5%; 1,0%; 1,5%; dan 2,0% (b/b). Kemudian beras ketan yang telah melalui tahapan peragian akan dilakukan proses fermentasi selama 1, 2, 3, dan 4 hari, sesuai dengan perlakuan penelitian. Pada tahap ini akan terjadi proses fermentasi yang mengubah aroma dan rasa dari beras ketan menjadi tapai ketan.

3.7 Prosedur Pengambilan Data

Sampel uji pada penelitian ini menggunakan tapai ketan yang telah melalui tahap peragian. Sampel tapai ketan yang telah ditimbang seberat 30 gram pada setiap variasi konsentrasi ragi ditempatkan ke dalam *beaker glass*. Kemudian *beaker glass* yang telah berisi sampel ditutup rapat dan dilakukan proses fermentasi. Pengambilan data dilakukan dengan menghubungkan selang

rangkaian sistem e-nose pada bagian penutup *beaker glass* sehingga akan tertangkap uap dari senyawa volatil yang terkandung di dalam sampel. *Array sensor* dari hidung elektronik akan mendeteksi senyawa volatil dari uap sampel yang mengalir masuk kedalam *chamber* sensor. Dijalankan *software* Maliki Nose dengan pengaturan durasi *sensing* selama 5 detik, *delay* selama 6 detik, dan *purging* selama 30 detik, sehingga didapatkan data numerik hasil pengujian. Setiap sampel dilakukan pengambilan data sebanyak 10 kali pengulangan.

3.8 Analisis Data

Analisis data pada penelitian ini menggunakan metode PCA. Data hasil pengukuran diolah dengan metode PCA pada *software* Origin. Penggunaan metode PCA ini bertujuan untuk mereduksi dimensi data dan menghasilkan komponen utama yang tidak saling berkorelasi. PC1 diperoleh dari *eigenvalue* terbesar pertama dan PC2 dari *eigenvalue* terbesar kedua. Analisis lebih lanjut dilakukan pada grafik PCA yang terbentuk sehingga pola aroma dari senyawa organik volatil yang terkandung di dalam tapai ketan dapat diidentifikasi.

3.9 Data Hasil Pengukuran

Tabel 3.1 Data Hasil Pengukuran Sampel Tapai Ketan

Ragi (%)	Pengulangan Sampel	Sensor					
		MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
0,5	1						
	2						
	3						
							
	10						
1,0	1						
	2						

	3						
							
	10						
1,5	1						
	2						
	3						
							
	10						
2,0	1						
	2						
	3						
							
	10						

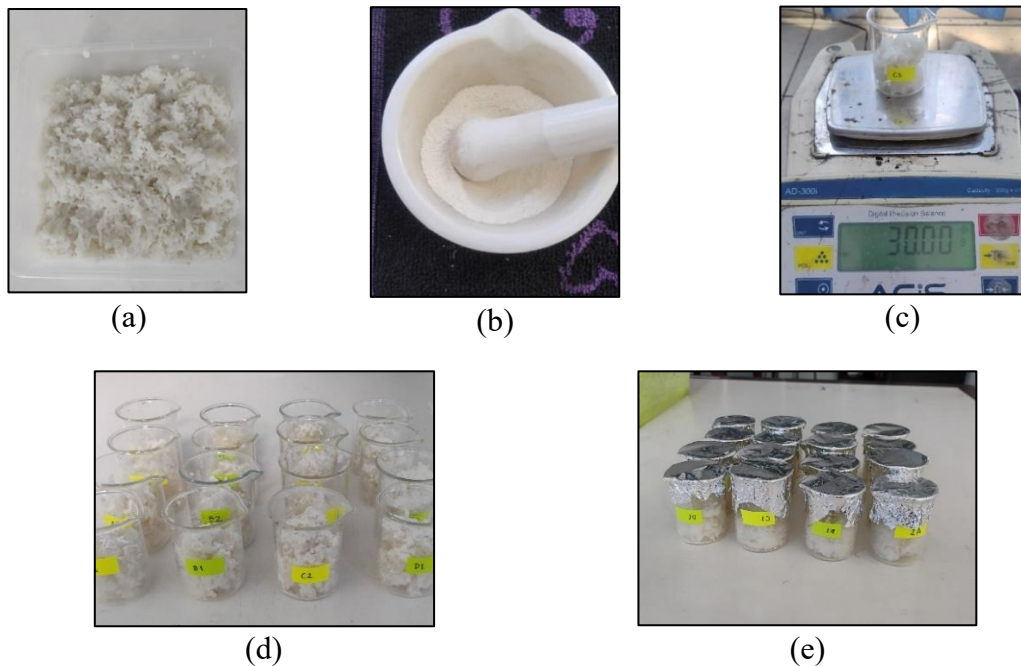
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Tapai Ketan

4.1.1. Preparasi Sampel Tapai Ketan

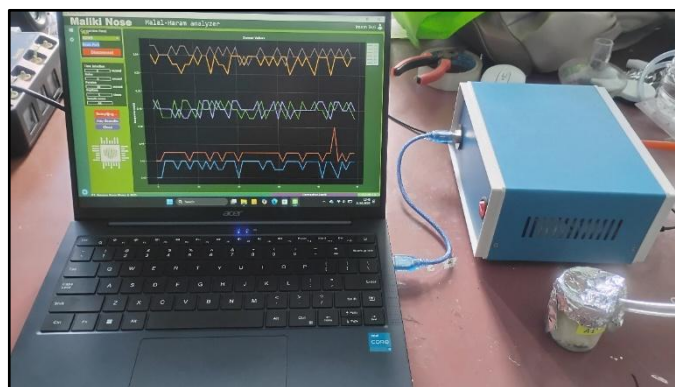
Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah tapai ketan. Sampel tapai ketan dibuat dengan bahan baku beras ketan putih. Beras ketan putih yang telah matang ditimbang sebanyak 30 gram dan diberi penambahan ragi sebanyak 0,5%; 1,0%; 1,5%; dan 2,0% (b/b) serta dilakukan fermentasi selama 1; 2; 3; dan 4 hari sebagai variasi pada penelitian ini. Preparasi sampel ini dilakukan di Laboratorium Termodinamika, Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.



Gambar 4.1 Preparasi sampel: (a) beras ketan putih matang; (b) penghalusan ragi; (c) penimbangan sampel; (d) pemberian ragi pada sampel; (e) sampel tapai ketan difermentasi

4.1.2 Prosedur Pengambilan Data Sampel Tapai Ketan

Pengambilan data sampel tapai ketan dilakukan dengan rangkaian e-nose. Setiap sampel tapai ketan di dalam *beaker glass* yang telah melalui proses fermentasi dikondisikan bagian penutupnya dengan selang pada rangkaian e-nose untuk selanjutnya diambil data numerik hasil pembacaan *array* sensor pada hari pertama, kedua, ketiga, dan keempat. Pengambilan data dilakukan dengan menjalankan *software* Maliki Nose yang telah terhubung dengan sistem e-nose. Pengujian sampel ini dilakukan di Laboratorium Sensor, Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.



Gambar 4.2 Proses pengambilan data pada sampel penelitian

4.1.3 Hasil Pengambilan Data Sampel Tapai Ketan

Hasil yang diperoleh dalam tahapan pengambilan data pada setiap sampel tapai ketan selama proses fermentasi dengan menggunakan rangkaian e-nose berupa data numerik pembacaan sensor gas. Hasil pengujian setiap sampel ini diperoleh dari *data logger* sistem e-nose. Data yang telah diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan nilai rata-rata pembacaan masing-masing sampel pada tiap-tiap sensor gas sebagaimana disajikan pada Lampiran 3.

4.2 Hasil Pengolahan Data Tapai Ketan dengan Metode *Principal Component Analysis* (PCA)

Setelah meninjau data primer dari *sensor array* pada tahap sebelumnya, pengolahan data dilanjutkan dengan ekstraksi fitur dengan algoritma integral sebagaimana hasilnya disajikan pada Lampiran 4. Data respons yang dihasilkan oleh keenam sensor merupakan data multivariat berdimensi tinggi yang memiliki kemungkinan saling berkorelasi satu sama lain. Oleh karena itu, penerapan metode PCA dalam penelitian ini bertujuan untuk mereduksi dimensi data tersebut tanpa menghilangkan informasi dan varians penting yang terkandung di dalamnya.

4.2.1 Analisis Karakteristik *Sensor Array* Melalui *Scree Plot*

Penentuan jumlah *Principal Component* (PC) yang ideal merupakan tahapan penting sebelum pemetaan data dalam PCA. Representasi data multivariat dari *sensor array* e-nose diperoleh dari hasil analisis nilai eigen (*eigenvalue*) dan persentase variansi (*percentage of variance*). Hasil perhitungan variansi data sampel tapai ketan secara kronologis dari hari ke-1 hingga hari ke-4 disajikan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Variansi data sampel tapai ketan

Fermentasi	PC	Eigenvalue	Percentage of Variance	Cumulative
Hari ke-1	1	5,86796	97.80%	97.80%
	2	0,08346	1.39%	99.19%
	3	0,02823	0.47%	99.66%
	4	0,01131	0.19%	99.85%
	5	0,00666	0.11%	99.96%
	6	0,00238	0.04%	100.00%

Fermentasi	PC	Eigenvalue	Percentage of Variance	Cumulative
Hari ke-2	1	5,32091	88.68%	88.68%
	2	0,47383	7.90%	96.58%
	3	0,07186	1.20%	97.78%
	4	0,05898	0.98%	98.76%
	5	0,05241	0.87%	99.63%
	6	0,02201	0.37%	100.00%
Hari ke-3	1	4,74075	79.01%	79.01%
	2	0,94831	15.81%	94.82%
	3	0,19845	3.31%	98.13%
	4	0,06555	1.09%	99.22%
	5	0,03584	0.60%	99.82%
	6	0,0111	0.18%	100.00%
Hari ke-4	1	4,82508	80.42%	80.42%
	2	0,7719	12.87%	93.28%
	3	0,19442	3.24%	96.52%
	4	0,15508	2.58%	99.11%
	5	0,03545	0.59%	99.70%
	6	0,01807	0.30%	100.00%

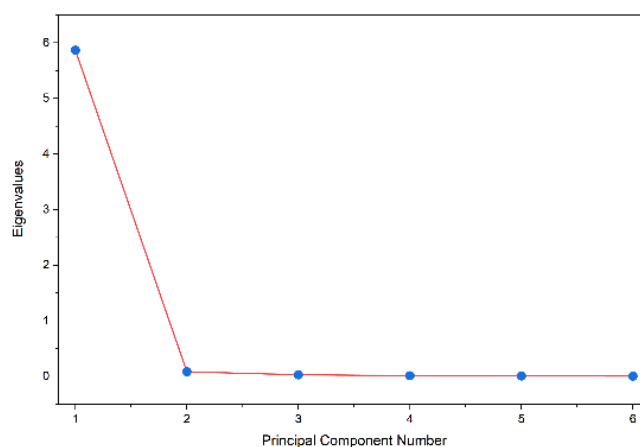
Berdasarkan Tabel 4.1, terlihat bahwa variansi data dari *sensor array* mampu direduksi secara optimal menjadi dua komponen utama (PC1 dan PC2). Pada fermentasi hari ke-1, PC1 memiliki *eigenvalue* sebesar 5,86796 dengan kontribusi variansi yang sangat dominan, yaitu mencapai 97,80%, sedangkan PC2 hanya menyumbang 1,39%. Akumulasi total variansi dari kedua PC ini telah mencapai 99,19%. Tingginya dominasi PC1 di hari pertama mengonfirmasi bahwa pola respons seluruh sensor masih sangat seragam dan searah, disebabkan oleh emisi gas yang homogen pada awal dekomposisi pati.

Memasuki hari ke-2, nilai *eigenvalue* PC1 sedikit menurun menjadi 5,32091 dengan persentase variansi 88,68%, namun persentase variansi pada PC2 mengalami peningkatan yang cukup signifikan menjadi 7,90%. Akumulasi kumulatif PC1 dan PC2 pada hari kedua berada pada angka 96,58%. Peningkatan variansi pada PC2 ini secara fisis mengindikasikan bahwa *sensor array* mulai menangkap adanya variasi arah data yang baru (ortogonal), yang dipicu oleh diversifikasi senyawa volatil baru berupa alkohol (etanol) di dalam ruang sampel.

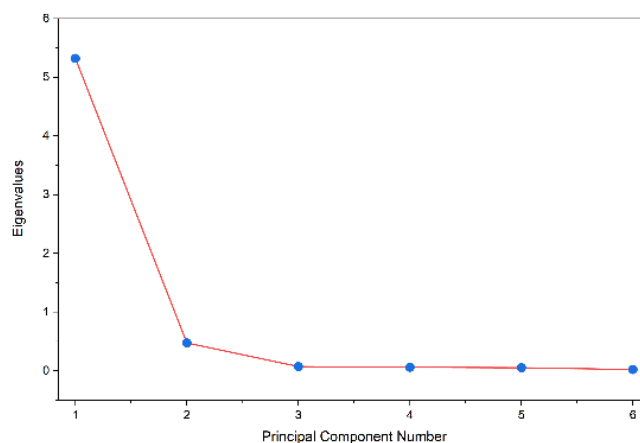
Pada hari ke-3, fenomena pergeseran variansi menjadi semakin kontras. Kontribusi PC1 turun ke titik 79,01%, sementara PC2 melonjak tajam hingga mencapai persentase variansi tertingginya selama pengamatan, yaitu sebesar 15,81% dengan nilai akumulasi kumulatif dari PC1 dan PC2 sebesar 94,82%. Lonjakan variansi PC2 yang signifikan pada hari ketiga ini merepresentasikan fase kematangan optimal tapai, dimana interaksi biokimia yang kompleks menghasilkan puncak emisi senyawa VOCs yang heterogen, sehingga memaksa sistem PCA mendistribusikan variansi data ke sumbu dimensi kedua (PC2) secara lebih luas.

Pada hari ke-4, saat sampel memasuki fase lewat matang (*over-fermented*), PC1 kembali sedikit meningkat ke angka 80,42% dengan PC2 sebesar 12,87%, menghasilkan akumulasi kumulatif sebesar 93,28%. Pola konsistensi nilai akumulasi kumulatif PC1 dan PC2 yang selalu berada di atas 90% pada setiap harinya menunjukkan bahwa sistem e-nose yang digunakan memiliki tingkat simplifikasi data yang sangat baik tanpa kehilangan informasi penting dari data mentahnya.

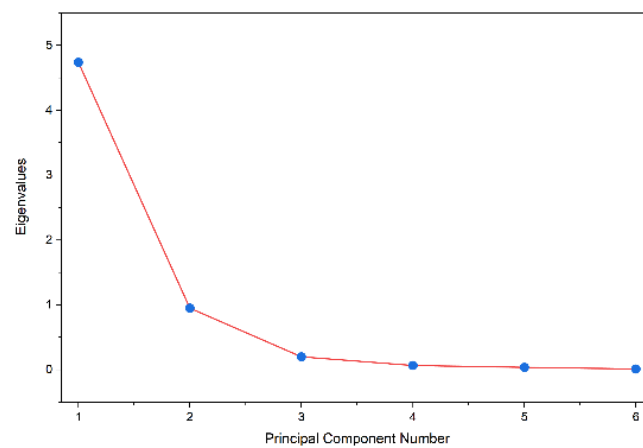
Penentuan jumlah PC ini didukung secara visual oleh grafik *Scree Plot* dari hari ke-1 hingga hari ke-4 (Gambar 4.3 sampai dengan Gambar 4.6). Grafik *Scree Plot* menunjukkan hubungan antara nomor PC dengan nilai eigen yang dihasilkan. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat adanya penurunan yang sangat curam dari PC1 menuju PC2 pada semua durasi fermentasi. Setelah melewati PC2, grafik bergerak melandai menuju PC3 hingga PC6 dengan nilai eigen yang mendekati 0 (nol). Sebagaimana kriteria Kaiser, hasil visualisasi *Scree Plot* ini menunjukkan bahwa PC1 dan PC2 sudah lebih dari cukup untuk menjelaskan struktur variansi data total sampel tapai ketan.



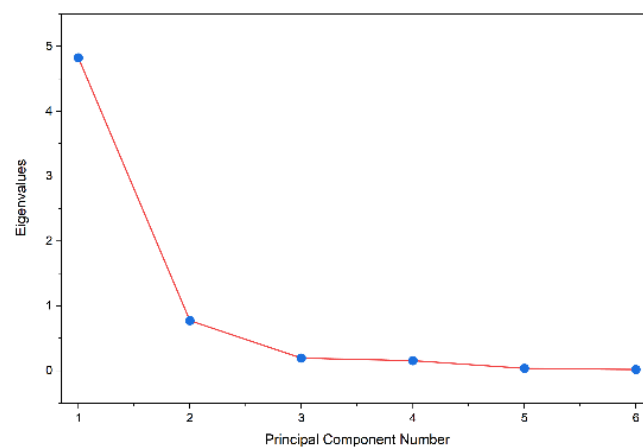
Gambar 4.3 *Scree Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1



Gambar 4.4 *Scree Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-2



Gambar 4.5 *Scree Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-3



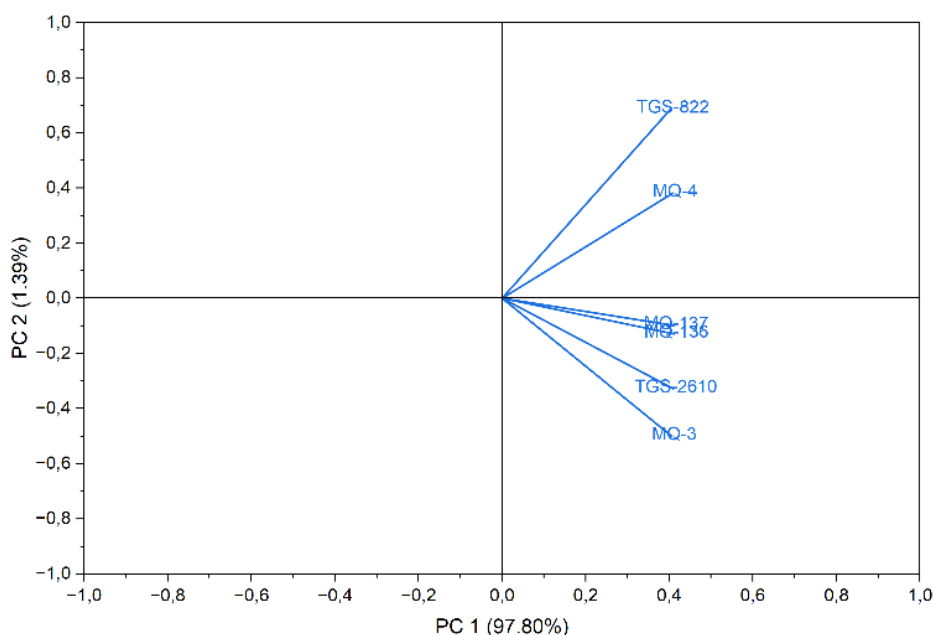
Gambar 4.6 *Scree Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-4

4.2.2 Analisis Karakteristik *Sensor Array* Melalui *Loading Plot*

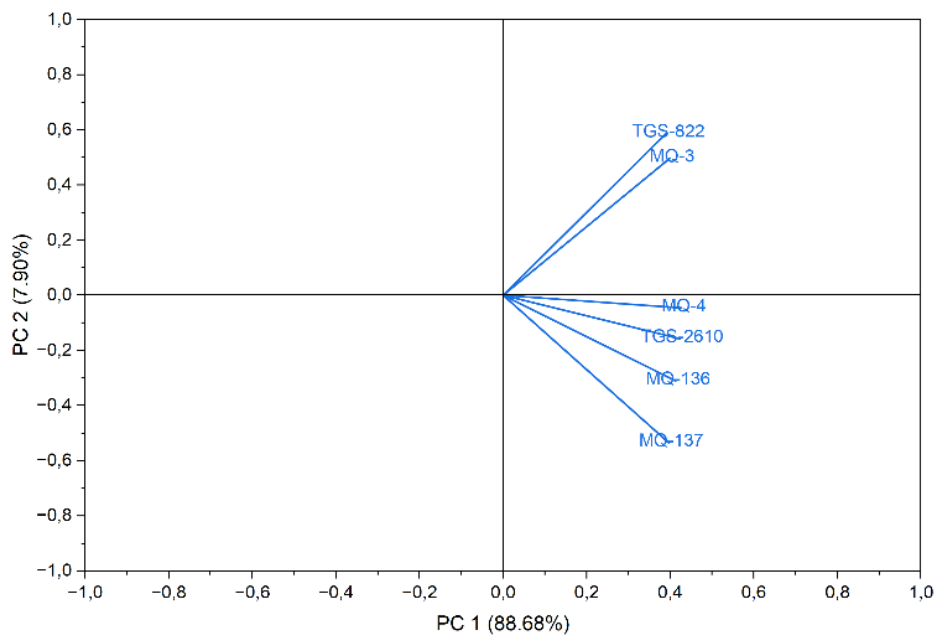
Setelah mengevaluasi grafik *Scree Plot*, tahapan selanjutnya dalam metode PCA adalah menginterpretasikan *Loading Plot*. Grafik *Loading Plot* berfungsi untuk memvisualisasikan tingkat korelasi serta besaran kontribusi dari masing-masing variabel asli, yaitu keenam sensor gas (MQ-3, MQ-4, MQ-136, MQ-137, TGS-822, dan TGS-2610), terhadap pembentukan dua komponen utama (PC1 dan PC2). Vektor atau titik variabel yang berada semakin menjauhi titik pusat koordinat (0,0) mengindikasikan bahwa sensor tersebut memiliki bobot pengaruh

(*loading*) yang tinggi dan sangat responsif terhadap perubahan aroma selama proses fermentasi berlangsung.

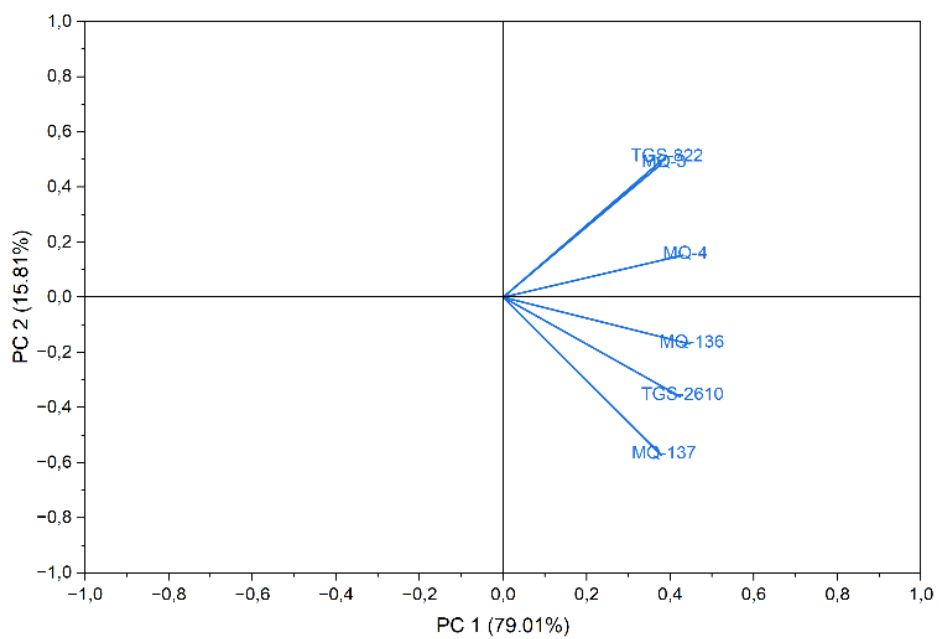
Selain itu, kedekatan jarak antar vektor sensor juga mencerminkan tingkat korelasi di antara variabel tersebut, dimana sensor yang posisinya berdekatan atau searah menunjukkan bahwa keduanya menangkap jenis senyawa volatil yang memiliki karakteristik serupa. Dalam pengujian sampel tapai ketan ini, analisis *Loading Plot* bertujuan untuk mengidentifikasi secara spesifik sensor mana yang paling dominan dalam mendiskriminasi perbedaan konsentrasi ragi serta tingkat kematangan sampel. Pemetaan vektor dari plot hasil keluaran masing-masing sensor tersebut dapat dilihat secara rinci pada gambar berikut:



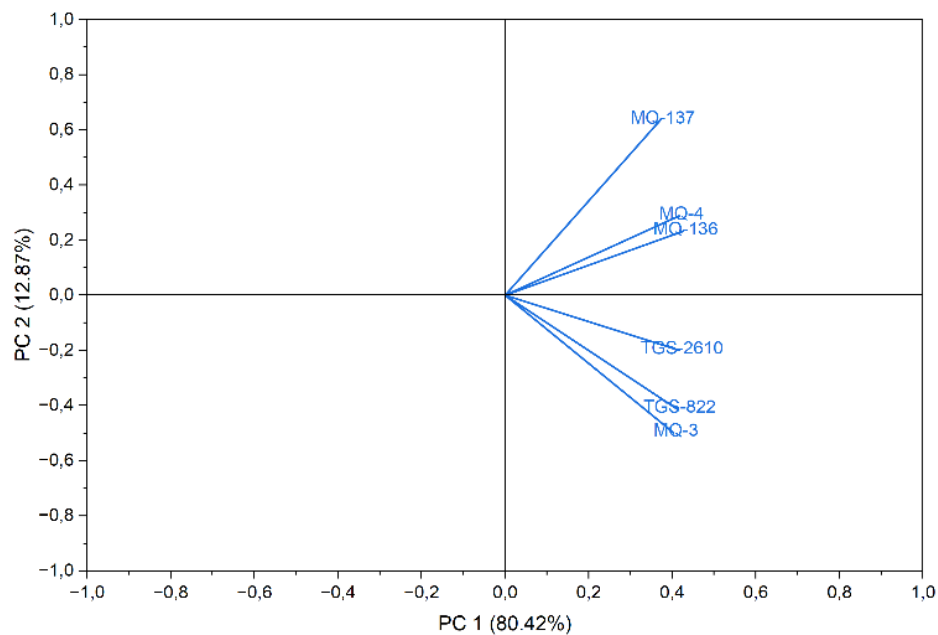
Gambar 4.7 *Loading Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1



Gambar 4.8 *Loading Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-2



Gambar 4.9 *Loading Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-3



Gambar 4.10 *Loading Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-4

Berdasarkan Gambar 4.7 (*Loading Plot* fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1), persentase total akumulasi variansi data didominasi penuh oleh PC1 sebesar 97,80%, sedangkan PC2 hanya berkontribusi sebesar 1,39%. Pada fase awal fermentasi ini, seluruh vektor karakteristik dari keenam sensor (TGS-822, MQ-4, MQ-137, MQ-136, TGS-2610, dan MQ-3) mengelompok secara seragam di sisi kanan atau kuadran PC1 positif. Pola ini mengindikasikan bahwa pada awal proses, *sensor array* merespons emisi gas secara homogen yang didominasi oleh pelepasan kadar air (*humidity*) dan volatilitas awal dari penguraian amilum menjadi glukosa oleh ragi fermentasi. Akibatnya, sifat spesifik (*cross-sensitivity*) antar sensor belum terlihat menonjol pada pemisahan data di hari pertama.

Memasuki hari ke-2 fermentasi (Gambar 4.8), dinamika pemisahan data mulai terjadi, ditandai dengan penurunan persentase PC1 menjadi 88,68% dan peningkatan variansi pada PC2 menjadi 7,90%. Perubahan paling signifikan

terlihat pada pergeseran vektor sensor MQ-3 dan TGS-822 yang secara bersamaan bergerak naik menuju kuadran kanan atas (PC1 positif, PC2 positif). Berdasarkan spesifikasi teknisnya, sensor MQ-3 memiliki selektivitas yang sangat tinggi terhadap gas alkohol jenis etanol, sedangkan TGS-822 responsif terhadap uap pelarut organik termasuk senyawa volatil alkohol. Pergerakan linear kedua sensor ini ke dalam satu kelompok kuadran membuktikan adanya korelasi positif yang kuat di antara keduanya, yang dipicu oleh mulai terbentuknya senyawa volatil alkohol hasil aktivitas metabolisme khamir (*Saccharomyces cerevisiae*) dalam mengubah glukosa menjadi etanol.

Pada hari ke-3 (Gambar 4.9), pola diferensiasi sensor semakin tegas seiring dengan meningkatnya variansi PC2 secara signifikan mencapai 15,81% (PC1 sebesar 79,01%). Pada grafik *Loading Plot* ini, dapat diamati bahwa vektor sensor TGS-822 dan MQ-3 berhimpit secara sempurna dengan nilai pemuatan (*loading score*) yang tinggi pada sumbu PC2 positif. Fenomena berhimpitnya kedua sensor alkohol ini membuktikan tingkat homogenitas respons yang sangat tinggi dalam menangkap sinyal gas dominan di dalam ruang sampel (*headspace*). Hari ke-3 ini menandai fase kematangan optimal dari tapai ketan putih, di mana emisi gas alkohol berada pada konsentrasi puncak dan bertindak sebagai faktor pembeda paling kuat dalam memisahkan kluster aroma pada metode PCA.

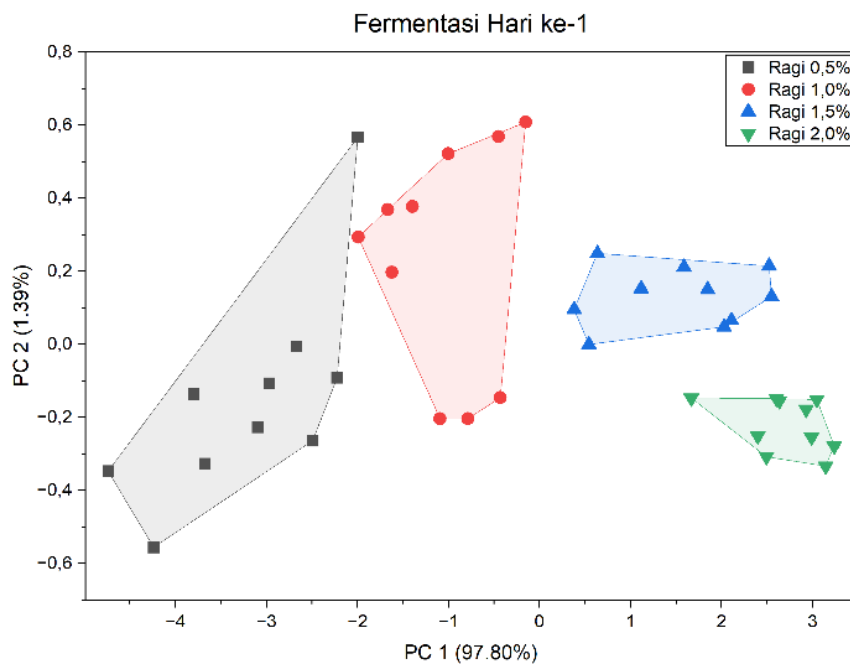
Namun, sebuah inversi pola yang sangat drastis dan ekstrem terjadi pada hari ke-4 fermentasi (Gambar 4.10), dimana variansi PC1 tercatat sebesar 80,42% dan PC2 sebesar 12,87%. Pada fase ini, vektor sensor MQ-137 mengalami lonjakan koordinat yang sangat tajam menuju kuadran atas (PC2 positif) menjauhi sensor MQ-3 dan TGS-822 yang bergeser kembali ke arah kuadran bawah (PC2

negatif). Secara biokimia, fenomena pergeseran ekstrem ini mengindikasikan bahwa tapai ketan putih telah memasuki fase lewat matang (*over-fermented*). Pada fase ini, senyawa etanol mulai mengalami oksidasi lanjutan menjadi asam asetat (senyawa asam volatil) serta dekomposisi senyawa organik kompleks lainnya. Sensor MQ-137 yang memiliki sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) terhadap senyawa turunan amonia dan volatil asam merespons lonjakan produk pembusukan/keasaman tersebut, sementara penurunan kontribusi MQ-3 pada PC2 mengonfirmasi bahwa dominasi gas alkohol murni telah bergeser menjadi gas asam yang menyengat.

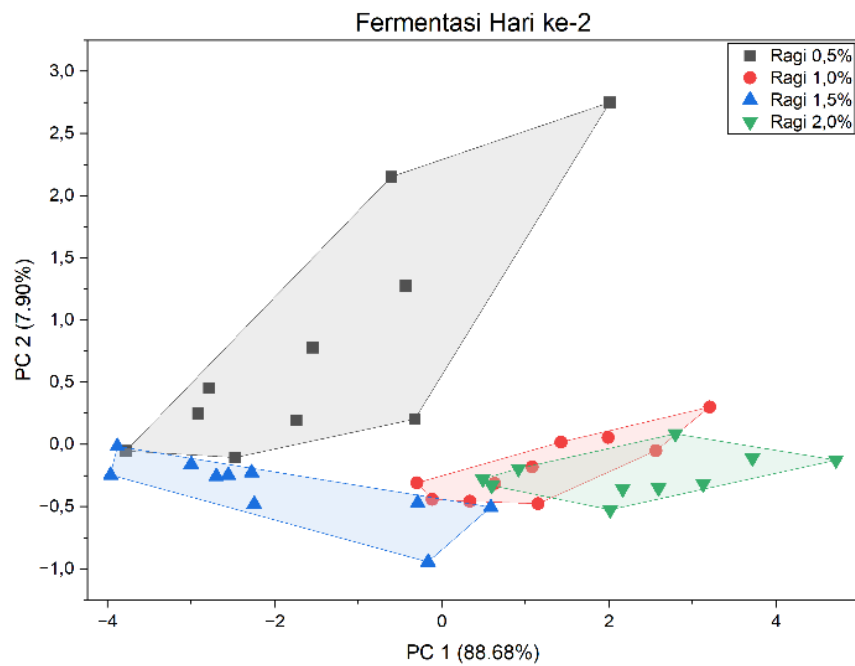
4.2.3 Analisis Karakteristik *Sensor Array* Melalui *Score Plot* 2D dan *Score Plot* 3D

Analisis data dilanjutkan dengan mengevaluasi *Score Plot*. Grafik *Score Plot* merupakan representasi visual dua atau tiga dimensi dari titik-titik sampel yang telah diproyeksikan ke dalam ruang komponen utama baru. *Score Plot* 2D merepresentasikan data berdasarkan sumbu PC1 dan PC2, sedangkan pada *Score Plot* 3D merepresentasikan data berdasarkan sumbu PC1, PC2, dan PC3. Penggunaan *Score Plot* ini bertujuan untuk mengamati struktur pola sebaran data serta kecenderungan pengelompokan (*clustering*) antar sampel uji. Prinsip dasar dalam interpretasi *Score Plot* adalah peninjauan jarak, dimana kedekatan spasial antar titik sampel merepresentasikan tingkat kemiripan pola aroma yang dideteksi oleh *sensor array*. Semakin berdekatan letak titik-titik tersebut, semakin identik karakteristik senyawa volatil yang dilepaskan, dan sebaliknya, jarak yang berjauhan mengindikasikan perbedaan pola gas yang signifikan.

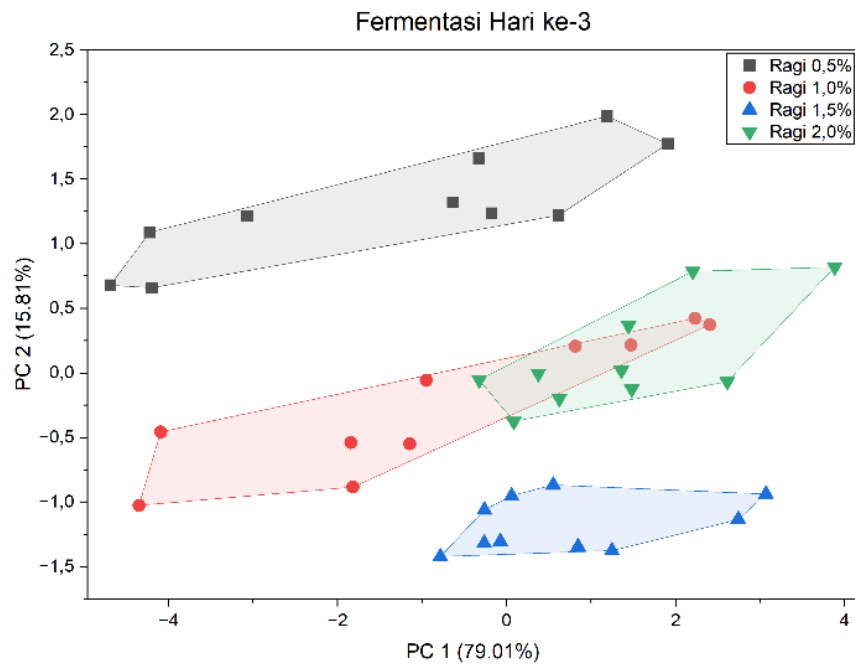
Melalui visualisasi *Score Plot*, dapat dianalisis apakah perbedaan konsentrasi ragi menghasilkan pengelompokan yang terpisah secara jelas (*clear separation*) atau justru menunjukkan adanya area yang saling bertumpang tindih (*overlap*). Selain itu, pengamatan terhadap arah pergerakan titik dari hari pertama hingga hari keempat mampu memberikan ilustrasi visual yang menyeluruh mengenai dinamika perubahan aroma seiring dengan bertambahnya tingkat kematangan tapai ketan. Hasil visualisasi *Score Plot* dari masing-masing sampel penelitian ini disajikan pada gambar berikut:



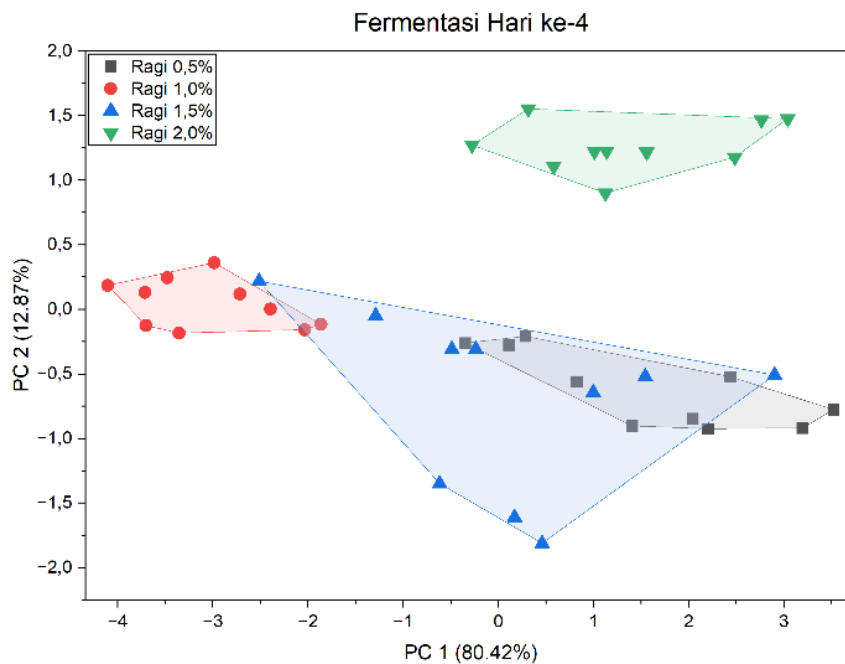
Gambar 4.11 *Score Plot* 2D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1



Gambar 4.12 *Score Plot* 2D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-2



Gambar 4.13 *Score Plot* 2D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-3



Gambar 4.14 *Score Plot* 2D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-4

Pada hari ke-1 (Gambar 4.11), sistem e-nose menunjukkan kemampuan diskriminasi yang sangat baik di sepanjang sumbu PC1 (97,80%). Kelompok sampel terpisah secara linear membentuk gradien berdasarkan tingkat konsentrasi ragi dari kiri ke kanan. Sampel dengan ragi 0,5% berada di area PC1 negatif ekstrem, diikuti oleh ragi 1,0% di area tengah, serta ragi 1,5% dan ragi 2,0% yang bergeser ke kanan pada area PC1 positif. Pola distribusi yang rapi dan tidak saling tumpang tindih ini membuktikan bahwa pada awal fermentasi, intensitas emisi gas awal yang dilepaskan berbanding lurus secara linear dengan kuantitas mikroorganisme (ragi) yang diinokulasikan ke dalam beras ketan.

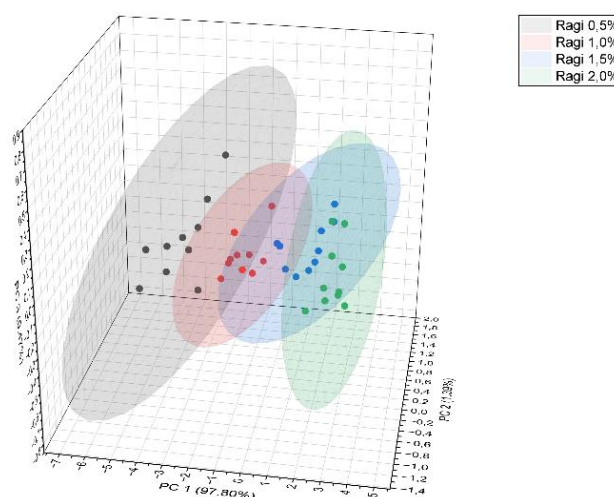
Pada hari ke-2 (Gambar 4.12), dinamika transisi aroma mulai terlihat kompleks dimana arah sebaran data tidak lagi linear pada sumbu PC1 (88,68%), melainkan mulai menyebar pada sumbu PC2 (7,90%). Kelompok ragi 0,5% mengalami perluasan klaster secara vertikal menuju PC2 positif. Sementara itu,

klaster ragi 1,0% dan ragi 2,0% mulai bergerak ke kanan atas dan saling mendekat. Perubahan posisi klaster ini mengindikasikan bahwa laju metabolisme ragi pada tiap variasi konsentrasi mulai menghasilkan densitas VOCs yang berbeda, dimana konsentrasi ragi yang lebih tinggi mempercepat transisi pembentukan senyawa alkohol lebih awal.

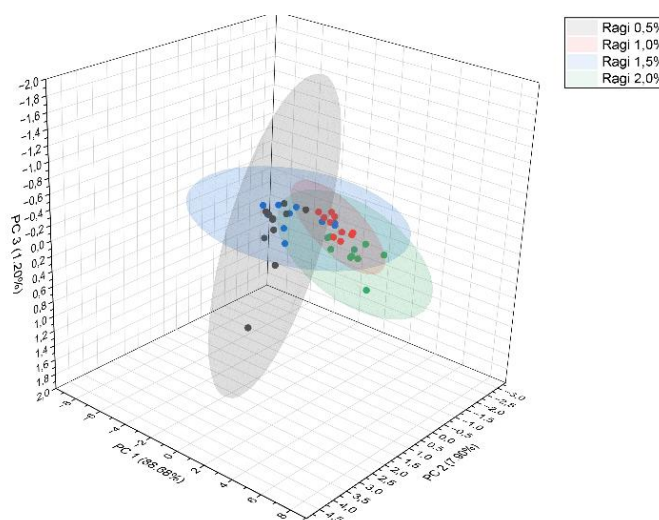
Memasuki hari ke-3 (Gambar 4.13), yang merupakan fase kematangan optimal tapai, grafik *Score Plot* menampilkan pola pemisahan klaster yang sangat unik berbentuk lapisan-lapisan horizontal sepanjang sumbu PC2 (15,81%). Klaster ragi 0,5% terisolasi penuh di bagian atas (PC2 positif), kelompok ragi 1,0% dan 2,0% membentuk lapisan di area tengah (PC2 netral), sedangkan ragi 1,5% berada di lapisan paling bawah (PC2 negatif). Kemampuan e-nose memisahkan keempat variasi sampel menjadi lapisan klaster yang tegas pada hari ke-3 ini mengonfirmasi bahwa karakteristik aroma tapai telah mencapai titik puncak masing-masing. Perbedaan konsentrasi ragi menghasilkan profil kombinasi kadar alkohol murni dan kadar gula yang khas, sehingga sistem PCA dapat mendiskriminasikannya dengan akurasi visual yang baik.

Fenomena ilmiah yang penting pada penelitian ini terjadi pada hari ke-4 (Gambar 4.14). Pada fase ini, arah klaster mengalami perubahan orientasi. Klaster dengan konsentrasi ragi 2,0% terpisah di kuadran atas (PC2 positif), sedangkan tiga variasi ragi lainnya (0,5%, 1,0%, dan 1,5%) jatuh dan saling tumpang tindih (*overlapping*) di kuadran bawah (PC2 negatif). Jika dikorelasikan secara fisis dengan grafik *Loading Plot* hari ke-4, area PC2 positif merupakan wilayah yang didominasi penuh oleh vektor sensor MQ-137 yang sensitif terhadap uap asam pembusukan dan amonia. Melompatnya klaster ragi 2,0% ke wilayah MQ-137 ini

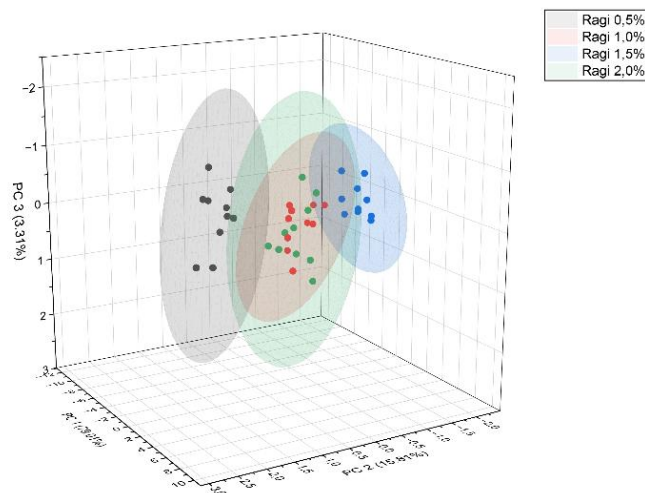
menjadi bukti empiris bahwa sampel dengan konsentrasi ragi tertinggi (2,0%) mengalami laju fermentasi yang jauh lebih akseleratif, sehingga pada hari ke-4 sampel tersebut telah melewati fase *over-fermented* dan mengalami pembusukan/keasaman lebih cepat dibanding variasi lainnya. Sebaliknya, kelompok ragi yang lebih rendah (konsentrasi 0,5% hingga 1,5%) masih tertahan di kuadran bawah karena emisi gasnya masih didominasi oleh sisa alkohol matang dan belum terdegradasi sepenuhnya menjadi asam volatil.



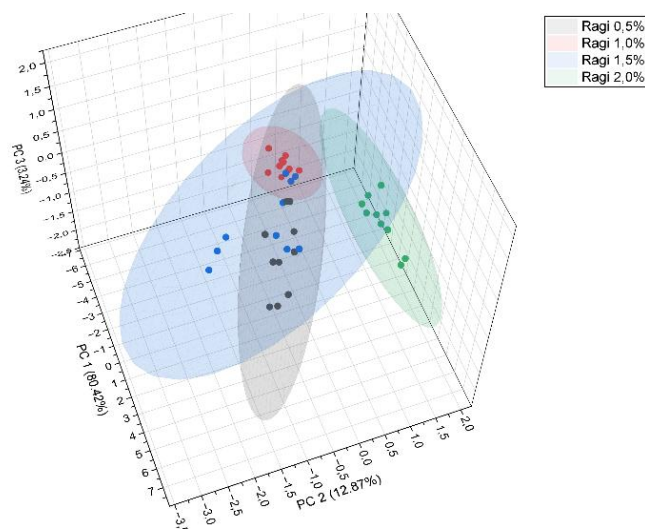
Gambar 4.15 *Score Plot* 3D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-1



Gambar 4.16 *Score Plot* 3D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-2



Gambar 4.17 *Score Plot* 3D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-3



Gambar 4.18 *Score Plot* 3D fermentasi sampel tapai ketan hari ke-4

Hasil visualisasi *Score Plot* 3D pada hari pertama fermentasi (Gambar 4.15) menunjukkan bahwa keempat klaster sampel (konsentrasi ragi 0,5%, 1,0%, 1,5%, dan 2,0%) tersusun secara berurutan dari kiri ke kanan membentuk gradien linear sepanjang sumbu PC1 (97,80%). Masing-masing klaster terwakili oleh *ellipsoid* yang tidak saling beririsan satu sama lain, menandakan keterpisahan spasial yang sempurna di antara keempat variasi konsentrasi ragi. Klaster ragi 0,5% menempati posisi paling kiri, diikuti secara berurutan oleh klaster ragi 1,0%,

1,5%, dan 2,0% ke arah kanan ruang. Kontribusi PC2 dan PC3 masing-masing tercatat sebesar 1,39% dan 0,61%, menunjukkan bahwa sebagian besar variansi data terkonsentrasi pada sumbu komponen utama pertama.

Pada hari kedua fermentasi (Gambar 4.16), dinamika perubahan VOCs mulai memodifikasi geometri distribusi data secara tiga dimensi. Kluster sampel dengan konsentrasi ragi 0,5% menunjukkan perluasan ruang (*stretching*) yang signifikan ke arah vertikal, sehingga mendominasi area PC3 dan PC2 positif. Sebaliknya, kluster sampel dengan konsentrasi ragi 1,0%, 1,5%, dan 2,0% cenderung bergerak saling mendekat dan membentuk formasi terpusat di area kuadran PC3 negatif. Meskipun visualisasi dua dimensi sebelumnya mengindikasikan adanya kecenderungan ketiga kluster konsentrasi tinggi tersebut untuk saling berdekatan, representasi *ellipsoid* 3D pada Gambar 4.16 mengonfirmasi bahwa ketiga kluster tersebut tetap terpisah secara spasial pada kedalaman sumbu PC3 (1,20%).

Hasil visualisasi *Score Plot* 3D pada hari ketiga fermentasi (Gambar 4.17) memperlihatkan distribusi keempat kluster sampel yang terstratifikasi pada posisi spasial yang berbeda-beda. Kontribusi PC1 tercatat sebesar 79,01%, PC2 sebesar 15,81%, dan PC3 sebesar 3,31%. Kluster ragi 0,5% menempati posisi paling kiri dengan *ellipsoid* yang kompak dan terpisah jelas dari kluster lainnya. Kluster ragi 1,0% dan 2,0% yang pada proyeksi dua dimensi tampak saling berhimpitan, dalam ruang tiga dimensi menempati posisi yang berbeda berdasarkan elevasi sumbu PC3. Kluster ragi 1,5% berada di sisi kanan ruang dengan distribusi titik yang relatif melebar. Keempat *ellipsoid* kluster sampel tidak menunjukkan irisan

antar volume ruang, sehingga seluruh variasi konsentrasi ragi terpisah secara independen.

Hasil visualisasi *Score Plot* 3D pada hari keempat fermentasi (Gambar 4.18) memperlihatkan perubahan distribusi spasial yang paling mencolok dibandingkan hari-hari sebelumnya. Kontribusi PC1 tercatat sebesar 80,42%, PC2 sebesar 12,87%, dan PC3 sebesar 3,24%. Klaster ragi 2,0% mengalami pergeseran ekstrem ke sisi kanan ruang dan membentuk koloni mandiri yang terisolasi jauh dari ketiga klaster lainnya pada area PC2 positif. Sebaliknya, gugus ragi 0,5%, 1,0%, dan 1,5% terkonsentrasi dalam zona yang berdekatan di area PC1 dan PC2 negatif, meskipun masing-masing *ellipsoid* ketiga klaster tersebut masih dapat dibedakan posisinya pada dimensi PC3. Jarak spasial antara klaster ragi 2,0% dengan tiga klaster lainnya tampak jauh lebih besar dibandingkan jarak spasial yang teramati pada hari-hari sebelumnya.

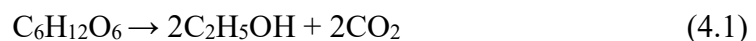
4.3 Pola Aroma VOCs Tapai Ketan

Melalui metode PCA, sekumpulan variabel sensor asli diproyeksikan menjadi variabel baru yang saling bebas (*orthogonal*), yang disebut sebagai *Principal Component* (PC). Dalam penelitian ini, PCA digunakan untuk memvisualisasikan pola sebaran dan mengidentifikasi apakah terdapat pengelompokan (*clustering*) yang jelas antara sampel dengan variasi konsentrasi ragi (0,5%, 1,0%, 1,5%, dan 2,0%) dan lama fermentasi (1, 2, 3, dan 4 hari).

Berdasarkan hasil ekstraksi data melalui PCA, visualisasi *Loading plot* pada Gambar 4.7 sampai dengan Gambar 4.10 menunjukkan sebaran kontribusi masing-masing sensor terhadap komponen utama (PC1 dan PC2). *Loading plot*

merepresentasikan tingkat korelasi antara variabel (sensor) dengan komponen utama, dimana semakin jauh letak titik sensor dari titik pusat (0,0), maka semakin besar kontribusinya dalam menjelaskan variansi data. Dari visualisasi *Loading Plot* pada keempat variasi konsentrasi ragi, terlihat sebuah pola yang konsisten dimana seluruh deret sensor (MQ-3, TGS-822, MQ-136, MQ-4, TGS-2610, dan MQ-137) mengelompok pada kuadran sisi positif dari *Principal Component 1* (PC1). PC1 sendiri merupakan komponen yang paling dominan dalam merangkum informasi data. Mengelompoknya seluruh sensor pada sisi positif PC1 mengindikasikan bahwa keenam sensor tersebut memiliki korelasi yang searah dan bekerja secara sinergis dalam merespons profil aroma (senyawa volatil) yang menguap dari sampel selama proses fermentasi berlangsung.

Dominansi respon sensor MQ-3 dan TGS-822 dalam penelitian ini sejalan dengan prinsip dasar biokimia fermentasi ragi. Menurut Maicas (2020), secara biokimia ragi melakukan fermentasi dengan memecah piruvat hasil metabolisme glukosa menjadi dua produk utama, yaitu etanol dan karbon dioksida (CO₂) sebagaimana dalam reaksi berikut:



Hal inilah yang menyebabkan sistem e-nose menangkap sinyal yang sangat kuat pada sensor yang sensitif terhadap alkohol (MQ-3) dan uap pelarut organik (TGS-822). Lebih lanjut, perubahan pola aroma yang terdeteksi pada *Score Plot* dari hari ke-1 hingga hari ke-4 merupakan representasi dari akumulasi senyawa volatil tersebut. Seiring dengan konversi gula menjadi etanol dan CO₂, ragi juga menghasilkan ratusan metabolit sekunder yang secara kolektif membentuk kompleksitas dan kualitas sensorik (aroma) dari sampel yang

difermentasi. Akumulasi senyawa-senyawa inilah yang kemudian diterjemahkan oleh algoritma PCA sebagai sidik jari aroma yang unik untuk setiap fase waktu dan konsentrasi ragi. Oleh karena itu, tingginya kontribusi kedua sensor ini pada *Loading Plot* secara teoritis terkonfirmasi oleh tingginya produksi etanol selama masa fermentasi sampel.

Di sisi lain, meskipun sensor seperti MQ-136 (sensitif terhadap gas hidrogen sulfida), MQ-137 (sensitif terhadap amonia), serta MQ-4 dan TGS-2610 (sensitif terhadap gas metana dan propana) memiliki target gas spesifik yang berbeda, sensor-sensor tersebut tetap menunjukkan respon yang signifikan dan membentuk klaster yang berdekatan. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui prinsip sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) yang umum terjadi pada sensor gas semikonduktor oksida logam (MOS). Proses fermentasi tidak hanya menghasilkan etanol secara tunggal, melainkan juga melepaskan campuran kompleks gas dan senyawa organik volatil (VOCs) lainnya. Sensitivitas silang dari larik sensor (*sensor array*) gas inilah yang memungkinkan sistem e-nose secara komprehensif merekam jejak pola aroma dari sampel secara utuh.

Selain mengamati kontribusi sensor, analisis PCA juga digunakan untuk memetakan dan mengklasifikasikan sampel berdasarkan kemiripan pola aromanya melalui *Score Plot*. Berdasarkan visualisasi *Score Plot* 2D pada Gambar 4.11 sampai dengan Gambar 4.14, terlihat adanya fenomena pengelompokan (*clustering*) data yang sangat jelas berdasarkan waktu pengukuran, yakni dari hari ke-1 hingga hari ke-4 pada seluruh variasi konsentrasi ragi. Hasil visualisasi tersebut menunjukkan pergerakan atau pergeseran posisi klaster secara konsisten di sepanjang sumbu *Principal Component* 1 (PC1). Pada hari ke-1 (ditandai

dengan warna hitam), sampel cenderung mengelompok di area negatif PC1 (sebelah kiri grafik). Seiring dengan bertambahnya waktu fermentasi menuju hari ke-2, ke-3, dan ke-4, posisi klaster sampel bergeser secara progresif menuju area positif PC1 (sebelah kanan grafik). Pergeseran spasial pada *Score Plot* ini mengindikasikan adanya perubahan karakteristik dan intensitas senyawa volatil secara nyata dari hari ke hari.

Secara teoritis, pergeseran pola aroma ini sangat berkaitan erat dengan fase pertumbuhan mikroorganisme (ragi) selama proses fermentasi. Pada hari ke-1, ragi umumnya masih berada pada fase adaptasi (*lag phase*) dimana pemecahan substrat belum terjadi secara masif, sehingga pelepasan gas maupun uap etanol masih dalam konsentrasi yang rendah. Hal ini menghasilkan respon sensor yang terpusat di satu area (kiri).

Memasuki hari ke-2 dan seterusnya, ragi memasuki fase pertumbuhan logaritmik atau eksponensial (*log phase*). Pada fase ini, aktivitas metabolisme ragi berada pada puncaknya dalam memecah glukosa menjadi etanol, karbon dioksida, dan berbagai senyawa organik volatil (VOCs) pembentuk aroma lainnya. Peningkatan akumulasi senyawa-senyawa inilah yang ditangkap secara sensitif oleh *sensor array* pada e-nose, sehingga mengubah nilai hambatan listrik pada sensor dan menghasilkan pola respon yang baru. Perubahan pola respon tersebut kemudian diolah dengan analisis PCA sebagai pergeseran titik koordinat sampel ke arah kanan pada *Score Plot* 2D. Meskipun pada beberapa titik terdapat sedikit tumpang tindih (*overlapping*) antar hari yang menunjukkan kemiripan fase transisi aroma, namun secara keseluruhan pemisahan klaster sangat terlihat, terutama pada konsentrasi ragi 1,0% dan 1,5%. Hasil ini membuktikan bahwa

sistem instrumentasi e-nose yang digunakan mampu bertindak sebagai metode non-destruktif yang baik dalam mendeteksi lama fermentasi sampel berdasarkan sidik jari atau pola aromanya.

Secara keseluruhan, hasil visualisasi *Score Plot* 3D selama empat hari fermentasi tapai ketan membuktikan bahwa sistem e-nose mampu mendiskriminasi keempat variasi konsentrasi ragi (0,5%, 1,0%, 1,5%, dan 2,0%) secara konsisten dan berkesinambungan sepanjang proses fermentasi berlangsung. Pada hari pertama, keterpisahan spasial keempat gugus sampel telah terbentuk secara sempurna dengan dominasi PC1 (97,80%), yang mengindikasikan bahwa perbedaan kuantitas inokulum ragi telah menghasilkan profil emisi VOCs yang dapat dibedakan sejak tahap awal fermentasi. Memasuki hari kedua dan ketiga, redistribusi spasial antar kluster semakin kompleks seiring dengan meningkatnya kontribusi PC2 dan PC3, yang mencerminkan diversifikasi profil senyawa volatil akibat perubahan aktivitas metabolisme ragi pada fase pertumbuhan dan kematangan. Puncak diferensiasi spasial yang paling terstruktur teramati pada hari ketiga, dimana keempat *ellipsoid* kluster sampel menempati wilayah ruang yang sepenuhnya independen tanpa irisan, mengonfirmasi bahwa fase kematangan optimal tapai ketan menghasilkan *volatile fingerprint* yang paling distingtif dan khas untuk setiap variasi konsentrasi ragi.

Pada hari keempat, terjadi perubahan pola distribusi yang paling unik, ditandai dengan isolasi spasial ekstrem kluster ragi 2,0% yang bergeser jauh dari ketiga kluster lainnya ke arah PC2 positif. Fenomena ini mengindikasikan bahwa fermentasi pada konsentrasi ragi tertinggi telah memasuki fase *over-fermented* dengan akumulasi senyawa metabolisme sekunder seperti asam volatil dan

amonias yang berlebihan, sehingga menghasilkan kinetika fermentasi yang berbeda secara fundamental. Dengan demikian, integrasi sistem e-nose dan analisis PCA dengan visualisasi *Score Plot* 3D efektif sebagai pendekatan non-destruktif dalam memetakan dinamika perubahan aroma VOCs fermentasi tapai ketan secara kuantitatif dan objektif berdasarkan variasi konsentrasi ragi.

Secara ilmiah, perbedaan letak kluster berdasarkan konsentrasi ragi ini dipengaruhi oleh kinetika reaksi fermentasi. Konsentrasi ragi yang ditambahkan pada awal proses (inokulasi) bertindak sebagai populasi awal mikroorganisme yang akan mendegradasi substrat. Perbedaan dosis ragi sebesar 0,5% hingga 2,0% berimplikasi langsung pada laju produksi metabolit. Sampel dengan konsentrasi ragi yang lebih tinggi (misalnya 2,0%) memiliki jumlah sel aktif yang lebih banyak, sehingga mampu mengonversi substrat menjadi etanol, gas karbon dioksida (CO_2), dan senyawa aromatik lainnya dengan laju yang lebih cepat dan intensitas yang lebih tinggi dibandingkan sampel dengan konsentrasi 0,5%.

Perbedaan laju akumulasi dan komposisi senyawa organik volatil (VOCs) di dalam ruang udara sampel inilah yang kemudian ditangkap secara spesifik oleh deret sensor e-nose. Perbedaan intensitas paparan gas menyebabkan variasi nilai konduktivitas pada permukaan sensor semikonduktor, yang pada akhirnya diekstraksi oleh PCA menjadi titik-titik koordinat yang saling berjauhan di dalam ruang 3D. Hal ini mengonfirmasi bahwa sistem instrumentasi e-nose yang dikembangkan tidak hanya sensitif terhadap lama proses fermentasi, tetapi juga memiliki tingkat selektivitas yang sangat baik dalam membedakan aroma VOCs berdasarkan variasi konsentrasi ragi yang diberikan.

Hasil deteksi *sensor array* pada sistem e-nose dalam penelitian ini sejalan dengan temuan Skwarek et al (2024), yang menjelaskan bahwa senyawa volatil pada produk fermentasi terbentuk melalui serangkaian reaksi biokimia yang sangat kompleks. Dalam penelitian tersebut, teridentifikasi berbagai kelompok senyawa utama yang meliputi golongan alkohol, aldehida, hidrokarbon, dan keton. Kehadiran kelompok-kelompok senyawa inilah yang menjadi alasan ilmiah mengapa larik sensor dalam sistem ini (seperti MQ-3 untuk alkohol dan TGS-822 untuk uap pelarut organik) mampu memberikan respon yang bervariasi. Hal ini menjelaskan mengapa analisis PCA mampu memetakan perbedaan konsentrasi ragi dan waktu fermentasi secara akurat ke dalam klaster-klaster yang terpisah pada *Score Plot*.

4.4 Kajian Integrasi Islam dan Sains

Penelitian klasifikasi aroma VOCs tapai ketan dengan menggunakan e-nose dan analisis PCA pada dasarnya merupakan upaya manusia untuk memahami keteraturan alam yang telah ditetapkan oleh Allah SWT. Dalam Al-Qur'an, Allah menegaskan bahwa segala sesuatu di alam semesta ini diciptakan dengan ukuran dan perhitungan yang sangat teliti, sebagaimana firman-Nya dalam QS. Al-Qamar ayat 49:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

Artinya: “*Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu sesuai dengan ukuran.*”

Menurut Quraish Shihab dalam *Tafsir Al-Misbah*, kata *biqadar* berasal dari akar kata yang bermakna “ukuran”. Allah menciptakan segala sesuatu dengan sistem, proporsi, dan ukuran yang sangat presisi. Beliau menggarisbawahi bahwa

ukuran tersebut mencakup sifat benda, durasi eksistensinya, dan interaksinya dengan benda lain. Jika ukuran atau proporsi alam semesta ini meleset sedikit saja, maka keseimbangan alam akan hancur. Oleh karena itu, alam semesta merupakan tatanan yang sangat harmonis karena segalanya diciptakan secara proporsional. Tafsir ayat ini menjelaskan bahwa setiap materi, reaksi kimia, hingga perubahan biologis memiliki ketetapan (*qadar*) yang presisi. Hasil penelitian yang menunjukkan nilai varians kumulatif PC1 mencapai hingga 97,80% merupakan bukti ilmiah adanya keteraturan tersebut. Pola yang terstruktur dalam *Score Plot* membuktikan bahwa perubahan aroma selama fermentasi bukanlah sebuah kebetulan yang acak, melainkan sebuah proses sistematis yang mengikuti hukum alam (*Sunnatullah*) yang telah terukur secara matematis.

Dilihat dari aspek kebermanfaatan hasil penelitian, penentuan tingkat kematangan tapai melalui analisis PCA berkaitan erat dengan prinsip *Halalan Thayyiban*. Islam memerintahkan umatnya untuk mengonsumsi makanan yang tidak hanya halal secara syariat, tetapi juga baik (*thayyib*) secara kualitas dan kesehatan. Hal ini disebutkan dalam QS. Al-Ma'idah ayat 88:

وَكُلُوا مِمَّا رَزَقَكُمُ اللَّهُ حَلَالًا طَيِّبًا ۚ وَاتَّقُوا اللَّهَ الَّذِي أَنْتُمْ بِهِ مُؤْمِنُونَ

Artinya: “Makanlah apa yang telah Allah anugerahkan kepadamu sebagai rezeki yang halal lagi baik, dan bertakwalah kepada Allah yang hanya kepada-Nya kamu beriman.”

Ibnu Katsir menjelaskan bahwa ayat ini adalah pengingat akan luasnya rezeki yang Allah berikan di muka bumi. Allah memerintahkan hamba-Nya yang beriman untuk menikmati rezeki tersebut, namun dengan batasan yang jelas, yakni menghindari yang haram. Selain itu, perintah untuk “bertakwa kepada Allah” yang dikaitkan dengan urusan konsumsi makanan menunjukkan bahwa menjaga

asupan gizi dan kehati-hatian dalam memilih makanan adalah bagian dari manifestasi iman dan ketakwaan seorang Muslim.

Merujuk pada Fatwa MUI Nomor 10 Tahun 2011, produk pangan hasil fermentasi yang mengandung alkohol hukumnya adalah halal selama dalam prosesnya tidak membahayakan dan tidak memabukkan (*muskir*). Data *Loading Plot* menunjukkan bahwa hingga hari ke-3 fermentasi, karakteristik aroma tapai masih didominasi oleh alkohol manis yang aman. Namun, lonjakan tajam emisi gas pada hari ke-4 (yang ditangkap secara ekstrem oleh sensor MQ-137) mengindikasikan terjadinya degradasi mutu pangan menjadi zat asam dan alkohol pekat yang berisiko mengganggu kesehatan pencernaan serta berpotensi mendekati sifat *muskir* (memabukkan). Oleh karena itu, melalui analisis e-nose berbasis PCA ini, dapat disimpulkan bahwa batas waktu optimal konsumsi tapai ketan yang memenuhi standar *thayyib* (baik dan aman) adalah hingga hari ke-3, sedangkan hari ke-4 merupakan batas kritis dimana produk sudah tidak direkomendasikan lagi untuk dikonsumsi. Secara sains, kematangan yang tepat memastikan kadar etanol tetap dalam batas konsumsi yang wajar dan rasa yang dihasilkan berada pada kondisi terbaik. Fenomena pada hari ke-4 ini memberikan kontribusi ilmiah pada aspek *Halalan Thayyiban*. Dari sudut pandang Islam-sains, variasi penggunaan konsentrasi ragi yang tinggi (2,0%) tidak direkomendasikan untuk penyimpanan hingga hari ke-4, karena percepatan kinetika kimianya memicu akumulasi senyawa volatil yang merusak mutu pangan (tidak *thayyib*) dan meningkatkan risiko timbulnya sifat memabukkan (*muskir*). Metode PCA membantu mengklasifikasikan sampel mana yang sudah mencapai standar *toyyib*

tersebut, sehingga teknologi berperan sebagai alat bantu manusia dalam menjalankan perintah agama untuk menjaga konsumsi pangan yang berkualitas.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Metode PCA digunakan dalam proses identifikasi pola aroma VOCs pada tapai ketan selama proses fermentasi berbasis e-nose. Proses identifikasi pola aroma VOCs pada durasi fermentasi tapai ketan selama empat hari dengan interval pengambilan data setiap satu hari pada setiap sampel dilakukan dengan analisis nilai eigen, visualisasi *Scree Plot*, *Loading Plot*, dan *Score Plot* 2D serta 3D.
2. Metode PCA efektif digunakan dalam klasifikasi pola aroma VOCs pada tapai ketan selama proses fermentasi berbasis e-nose. Metode PCA mampu mereduksi dimensi data dan mempertahankan informasi utama ditunjukkan dengan nilai kumulatif dua komponen utama (PC1 dan PC2) pada setiap durasi fermentasi (1, 2, 3, dan 4 hari) sampel tapai ketan yaitu sebesar 99,19%; 96,58%; 94,82%; dan 93,28%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem e-nose cukup akurat dalam mengklasifikasikan pola aroma VOCs.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian yang akan datang yaitu dilakukan pengujian lanjutan dengan menggunakan GC-MS agar dapat memberikan pola klasifikasi

tambahan secara kimiawi dari sisi komposisi senyawa volatil yang terkandung di dalam sampel tapai ketan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2017). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 9(4), e1416.
- Barus, S. P., & Wijaya, M. (2020). *Pengaruh Konsentrasi Ragi dan Lama Fermentasi Terhadap Kadar Alkohol dan Organoleptik Tape Ketan Putih*. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 24(1), 55-62.
- Brereton, R. G., & Lloyd, G. R. (2016). Partial least squares discriminant analysis: Taking the magic away. *Journal of Chemometrics*, 30(4), 134–140.
- Chen, Q., et al. (2018). Application of electronic nose for food quality evaluation. *Food Research International*, 109, 214–226.
- Chen, Q., et al. (2018). Application of multivariate analysis and visualization in sensor-based food quality evaluation. *Food Research International*, 109, 214–226.
- Dey, A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 83, 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.03.001>.
- Dzialo, M. C., Park, R., Steensels, J., Lievens, B., & Verstrepen, K. J. (2017). *Physiology, ecology and industrial applications of aroma formation by yeasts*. *FEMS Microbiology Reviews*, 41(1), 95–128.
- Feng, Y., Tian, X., Chen, Y. *et al.* Real-time and on-line monitoring of ethanol fermentation process by viable cell sensor and electronic nose. *Bioresour. Bioprocess.* 8, 37 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00391-5>.
- Huda, M. S., & Mulyadi, A. (2021). *Perspektif Sains dalam Kisah-Kisah Nabi: Analisis Fenomena Fisika dan Kimia dalam Al-Qur'an*. *Jurnal Studi Al-Qur'an dan Sains*, 9(2), 112-125.
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374(2065), 20150202.
- Karakaya, D., Ulucan, O., & Turkan, M. (2020). Electronic nose and its applications: A survey. *International Journal of Automation and Computing*, 17(2), 179–209. <https://doi.org/10.1007/s11633-019-1212-9>.
- Karakaya, D., Ulucan, O., & Turkan, M. (2020). Electronic Nose and Its Applications: A Survey. *International Journal of Automation and Computing*, 17(2), 179-209.

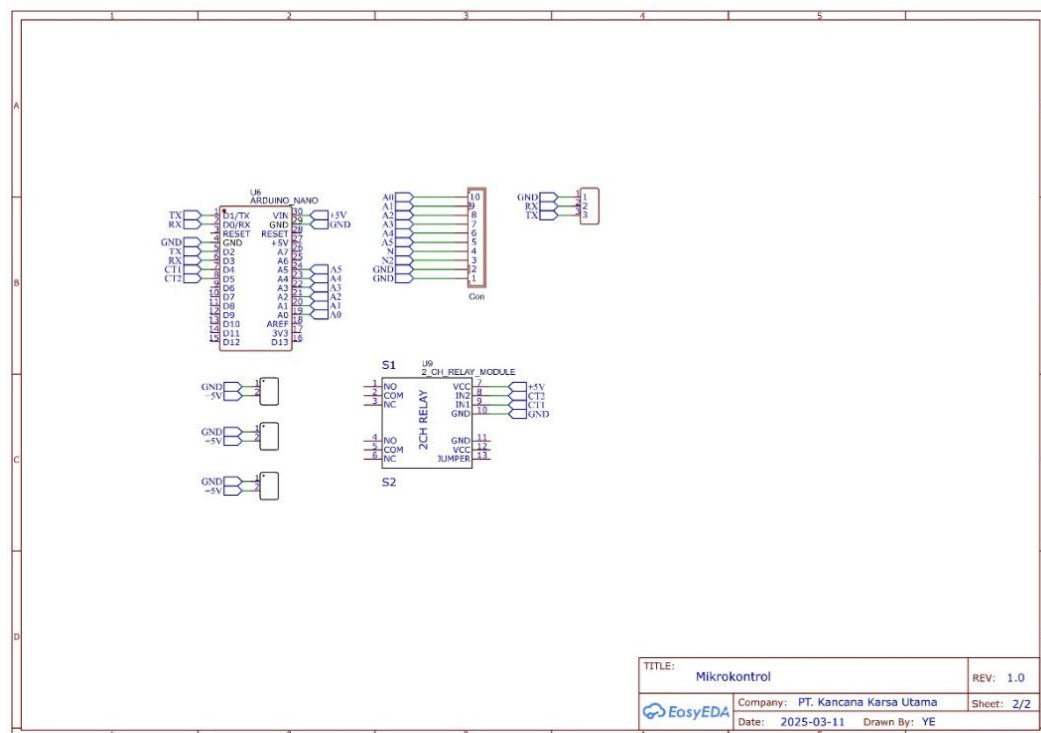
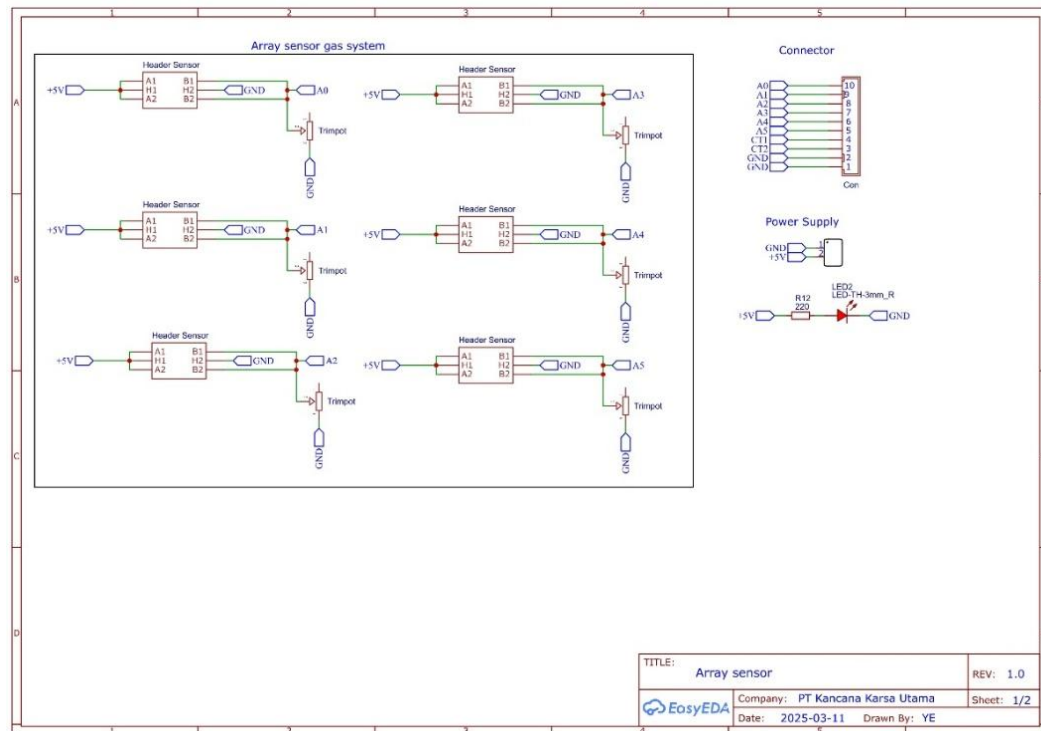
- Liu, S., Yang, L., Zhou, Y., & He, S. (2020). Characterization of key aroma compounds in fermented glutinous rice wine by varying the starter culture. *Food Research International*, 131, 1089-1099.
- Lyu, X., Xu, W., & Xie, G. (2019). Volatile compounds of traditional Chinese rice wine: Correlation with aroma characteristics and sensory attributes. *Journal of Food Science*, 84(11), 3336-3344.
- Maicas, S. (2020). The Role of Yeasts in Fermentation Processes. *Microorganisms*, 8(8), 1142.
- Marniza, M., Syafnil, S., & Fitria, S. (2020). *Karakteristik Tapai Ketan Hitam dengan Variasi Metode Pemasakan*. Jurnal Teknologi Agro-Industri, 7(2), 112-120.
- Muthmainnah, Tazi, I., Suyono, Ainur, A., Falah, F., & Santika, A.S. (2020). Analisis Kandungan Minyak Babi Pada Minyak Kanola Melalui Klasifikasi Pola Hidung Elektronik (E-Nose) Berbasis Linear Diskriminan Analysis (LDA). *Jurnal Fisika Flux*. 17(1), 15. DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v17i1.5132>.
- Nuraida, L. (2019). *Indonesian Traditional Fermented Foods: Processes, Characteristics, and Potential Health Benefits*. In *Traditional Foods: History, Preparation, Processing and Safety*. Springer.
- OriginLab Corporation. (2016). *Origin User Guide*. Northampton, MA: OriginLab.
- Pawestri, S., Pertiwi, M.G.P., & Perdhana, F.F. (2025). Kajian Literatur : Senyawa Volatil Pembentuk Flavor Terasi. *Jurnal Kolaboratif Sains*. 8(6), 3234–3245.
- Rajendran, S., Silcock, P., & Bremer, P. (2023). *Flavour Volatiles of Fermented Vegetable and Fruit Substrates: A Review*. Foods. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10096934/>.
- Roy, M., Yadav, B.K. Electronic nose for detection of food adulteration: a review. *J Food Sci Technol* 59, 846–858 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05057-w>.
- Sanaeifar, A., Mohtasebi, S. S., Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Siadat, M. (2017). *Application of an Electronic Nose System for Characterization of Saffron Aroma*. Journal of Food Science and Technology, 54(4), 984-993.
- Sanjaya, M., Roziqin, A., & Tim Robotika Bolabot. (2024). *Hidung Robot [E-Nose] Berbasis Deep Learning dengan Pemrograman Phyton serta Terapannya pada Teknologi Pangan*. Bandung: BOLABOT-CV Bolabot.

- Shiddiq, M., Fadlillah, A., Ningsih, S. A., & Husein, I. R. (2021). Rancang Bangun Sistem Hidung Elektronik Berbasis Sensor Gas MQ untuk Mengevaluasi Kualitas Madu. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 9(2), 143–152. <https://doi.org/10.23960/jtaf.v9i2.356>
- Shiddiq, M., Sitohang, L.B., Husein, I.R., Ningsih, S.A., Hermonica, S., & Fadlilah, A. (2021). Hidung Elektronik Berbasis Sensor Gas MOS untuk Karakterisasi Kematangan Buah Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 10(2), 171. DOI: <http://dx.doi.org/10.23960/jtep-l.v10.i2.170-182>.
- Shihab, M. Q. (2002). *Tafsir Al-Misbah*.
- Shtepliuk, I., Domènech-Gil, G., Almqvist, V. *et al.* Electronic nose and machine learning for modern meat inspection. *J Big Data* 12, 96 (2025). <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01151-4>.
- Simbolon, K., Sembiring, M., & Lubis, Z. (2022). *Analisis Mutu Tape Ketan Putih dengan Variasi Pembungkus dan Lama Fermentasi*. *Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, 6(2), 112-120.
- Skwarek, P., Lorenzo, J. M., Purriños, L., & Karwowska, M. (2024). Development of Volatile Compounds in Raw Fermented Sausages with Reduced Nitrogen Compounds-The Effect of Tomato Pomace Addition. *Molecules*, 29(24), 5826.
- Tamang, J. P., et al. (2016). *Functional Properties of Microorganisms in Fermented Foods*. *Frontiers in Microbiology*, 7, 578.
- Tazi, I., Muthmainnah, Suyono, Ainur, A., Falah, F., & Santika, A.S. (2018). Chemometric-Based Electronic Nose Application to Pork Oil and Olive Oil Using the Odor Pattern Classifications. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 10(2), 52–53.
- Vázquez-Araújo, L. (2023). Analysis of Volatile Compounds during Food Fermentation. *Foods*, 12(19), 3635. <https://doi.org/10.3390/foods12193635>.
- Wahyuningsih, E. A., Irmanda, L., Aji, Y. W. K., Hidayat, F. R., & Anindita, N. S. (2023). *Pengaruh Lama Fermentasi, Penambahan Ragi dan Konsentrasi Gula pada Tape Ketan*. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat LPPM Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta*, 1, 96–101.
- Wakhid, A., Yuliana, N. D., & Triyana, K. (2022). *Rapid identification of lard in meatball broth using electronic nose combined with chemometrics*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(9), 3742-3750.

- Wang, Z., Zhu, Z., Liu, J., & Yan, X. (2020). Recent advances in metal oxide-based gas sensors for portable and wearable electronics. *Journal of Semiconductors*, 41(4), 041602. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/41/4/041602>.
- Widyaningrum, T., & Nugroho, R. A. (2021). *Kinetika Fermentasi dan Perubahan Kualitas Kimia Tape Ketan Selama Penyimpanan*. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, 9(1), 23-31.
- Xu, E., Long, Z., & Wu, Z. (2018). *Characterization of volatile flavor compounds in Chinese rice wine fermented from enzymatic extruded rice*. *Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2099-2109.
- Yang, X., et al. (2019). Changes in volatile compounds during fermentation and their relationship with sensory quality. *Food Chemistry*, 276, 376–384.
- Zhang, H., Wang, J., & Ye, S. (2020). *Volatile organic compounds profiling and brewing characteristics of glutinous rice wine fermented by different traditional starters*. *Food Chemistry*, 309, 1257-1268.
- Zheng, Z., Zhang, C., Liu, K. *et al.* Volatile Organic Compounds, Evaluation Methods and Processing Properties for Cooked Rice Flavor. *Rice* 15, 53 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12284-022-00602-3>.

LAMPIRAN

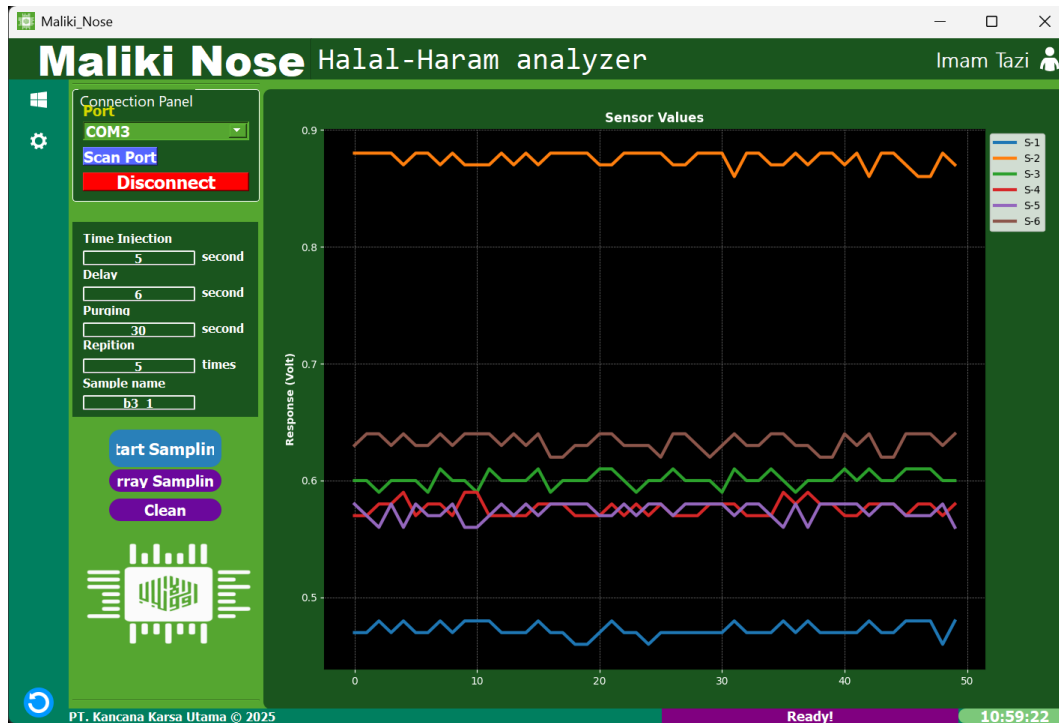
Skematik Rangkaian E-Nose



Lampiran 2

Pengambilan Data dengan *Software* Maliki Nose

Berikut hasil tangkapan layar pada proses pengambilan data dengan *software* Maliki Nose:



Lampiran 3

Data Hasil Pengujian Tapai Ketan

Sampel	Hari	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.4930	1.1679	0.7065	0.7400	0.6565	0.7624
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.4451	1.1486	0.6854	0.7279	0.6726	0.7806
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.5285	1.2026	0.7756	0.8047	0.7121	0.8100
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.4457	1.4152	0.7623	0.8192	0.6644	0.7220
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.4590	1.2030	0.7003	0.7459	0.6533	0.7465
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.4426	1.1681	0.6956	0.7355	0.6713	0.7952
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.4254	0.9912	0.6302	0.6478	0.5916	0.6763
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.4373	1.1624	0.6685	0.6960	0.6529	0.7472
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.5293	1.4781	0.8689	0.9709	0.7874	0.8649
Ragi 0,5%	Hari ke-1	0.4569	1.1174	0.7053	0.7348	0.6415	0.7277
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5816	1.9556	1.1280	1.2727	0.9747	0.9321
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5486	2.0976	1.0173	1.2275	0.8950	0.8703
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5879	2.1923	1.0543	1.2745	0.9439	0.9135
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5273	2.0587	1.0124	1.2161	0.8867	0.8583
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5418	1.8756	1.0651	1.2438	0.9419	0.8885
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5321	2.0132	1.0761	1.2830	0.9276	0.8697
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5160	1.8986	1.0563	1.2365	0.8988	0.8483
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5183	1.8742	1.0611	1.2354	0.8970	0.8511
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5802	1.8200	1.0046	1.0157	0.8199	0.8637
Ragi 0,5%	Hari ke-2	0.5500	1.9158	0.9978	1.1549	0.8879	0.8889
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.6526	2.3139	1.2651	1.4433	1.0682	0.9774
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.7077	2.4275	1.3114	1.5177	1.1657	1.0274
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.6893	2.3907	1.3178	1.5066	1.1253	1.0077
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.7509	2.2132	1.1818	1.4185	1.1794	1.0457
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.6903	2.4086	1.3196	1.5151	1.1205	0.9996
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.7026	2.4360	1.3546	1.5476	1.1354	1.0092
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.5767	2.0051	1.1056	1.2803	0.9683	0.8967
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.6866	2.4017	1.3077	1.4935	1.1175	1.0134
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.6405	2.2354	1.2259	1.3891	1.0432	0.9659
Ragi 0,5%	Hari ke-3	0.6492	2.2859	1.2582	1.4391	1.0668	0.9704
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6747	2.6070	1.3707	1.6644	1.1861	1.0410
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6576	2.4411	1.3297	1.6256	1.1645	1.0230
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6623	2.6146	1.3425	1.6384	1.1754	1.0333
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6555	2.5458	1.3024	1.5780	1.1592	1.0353
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6390	2.4420	1.3246	1.6303	1.1465	1.0035
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.7275	2.4822	1.2889	1.6147	1.2397	1.0928
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6659	2.4930	1.3573	1.6676	1.1807	1.0281
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6488	2.4484	1.3090	1.6351	1.1651	1.0242
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6724	2.4247	1.3525	1.6379	1.1791	1.0347
Ragi 0,5%	Hari ke-4	0.6470	2.5774	1.3054	1.5999	1.1596	1.0303

Sampel	Hari	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4793	1.7192	0.8518	1.0045	0.7943	0.8485
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4453	1.5965	0.7826	0.9155	0.7360	0.8069
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4536	1.5849	0.7871	0.9126	0.7374	0.8099
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4318	1.4740	0.7437	0.8543	0.6991	0.7761
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4597	1.6487	0.8298	0.9414	0.7628	0.8513
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4580	1.3964	0.8302	0.8751	0.6889	0.7231
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.5761	1.7316	0.9125	1.0407	0.8781	0.9515
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4755	1.3570	0.7583	0.8132	0.6809	0.7461
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4860	1.5280	0.8886	0.9545	0.7374	0.7580
Ragi 1,0%	Hari ke-1	0.4310	1.4790	0.7466	0.8808	0.7243	0.8051
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.5148	1.9851	1.1041	1.2795	0.9277	0.8400
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.5259	2.0169	1.1335	1.3033	0.9414	0.8456
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.5454	2.0872	1.1836	1.3730	0.9809	0.8675
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.4956	1.8853	1.0466	1.2003	0.8766	0.8132
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.5372	2.0555	1.1452	1.3300	0.9465	0.8551
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.4847	1.8396	1.0279	1.1786	0.8816	0.8113
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.5584	2.1315	1.2032	1.4063	0.9987	0.8766
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.5759	2.1266	1.2004	1.4230	1.0246	0.9155
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.5622	2.1253	1.2010	1.3916	1.0065	0.8921
Ragi 1,0%	Hari ke-2	0.5489	2.1187	1.1808	1.3757	0.9811	0.8704
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.8414	2.6763	1.5434	1.7569	1.3030	1.1151
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.6830	2.2395	1.3245	1.5164	1.1200	1.0079
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.7178	2.3919	1.4025	1.6220	1.1707	1.0312
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.7482	2.4111	1.4421	1.6666	1.2165	1.0555
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.5728	2.1449	1.2191	1.4407	1.0208	0.9119
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.5867	2.1840	1.2505	1.4817	1.0452	0.9235
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.6131	2.2826	1.3072	1.5342	1.0717	0.9364
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.6150	2.3110	1.3103	1.5413	1.0724	0.9369
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.6928	2.3794	1.3763	1.6046	1.1497	1.0129
Ragi 1,0%	Hari ke-3	0.6828	2.4262	1.3462	1.5777	1.1305	0.9924
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5813	2.3109	1.2332	1.5419	1.1035	0.9652
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5913	2.3266	1.2583	1.5612	1.1137	0.9712
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5616	2.2242	1.1658	1.4595	1.0494	0.9458
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5952	2.3571	1.2743	1.5804	1.1260	0.9789
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5844	2.3341	1.2366	1.5498	1.1120	0.9701
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5724	2.2994	1.2108	1.5222	1.1001	0.9610
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.6361	2.4286	1.3295	1.6436	1.1553	1.0063
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5859	2.3433	1.2315	1.5691	1.1334	0.9815
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5865	2.3252	1.2201	1.5343	1.0896	0.9701
Ragi 1,0%	Hari ke-4	0.5954	2.3489	1.2700	1.5769	1.1294	0.9841
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5907	2.0399	1.1469	1.3080	0.9394	0.9411
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5591	1.9500	1.0788	1.2429	0.9217	0.9102
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5205	1.7643	0.9538	1.0881	0.8336	0.8524
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5036	1.5755	0.9320	1.0367	0.8124	0.8305

Sampel	Hari	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5668	2.0121	1.1088	1.2766	0.9412	0.9222
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5972	2.0055	1.1308	1.2874	0.9512	0.9545
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5258	1.8286	1.0005	1.1440	0.8554	0.8708
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5366	1.7467	0.9428	1.0673	0.8441	0.8691
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5800	1.9330	1.1422	1.2717	0.9563	0.9321
Ragi 1,5%	Hari ke-1	0.5134	1.7274	0.9442	1.0726	0.8120	0.8456
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.4981	1.8468	1.0492	1.1637	0.9063	0.8270
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.5088	1.9430	1.1012	1.2662	0.9371	0.8345
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.5417	2.0960	1.1803	1.3687	1.0064	0.8775
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.5396	2.0689	1.1636	1.3600	0.9893	0.8675
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.5478	2.1059	1.1871	1.3812	0.9962	0.8729
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.5446	2.1156	1.1785	1.3747	0.9913	0.8740
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.5147	2.0080	1.1141	1.2868	0.9451	0.8447
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.4988	1.8929	1.0683	1.2129	0.9059	0.8184
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.5437	2.1099	1.1795	1.3557	1.0071	0.8824
Ragi 1,5%	Hari ke-2	0.5427	2.1004	1.1658	1.3641	0.9881	0.8723
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6370	2.4028	1.3511	1.6355	1.1244	0.9590
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6334	2.3927	1.3571	1.6439	1.1302	0.9558
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6216	2.3423	1.3360	1.6111	1.1108	0.9443
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6753	2.4950	1.4354	1.7414	1.1832	0.9838
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6288	2.3336	1.3360	1.6100	1.1083	0.9498
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6516	2.4583	1.3992	1.6986	1.1651	0.9713
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6362	2.4359	1.3740	1.6771	1.1617	0.9719
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.7149	2.5688	1.4904	1.8060	1.2123	1.0106
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6402	2.4230	1.3686	1.6623	1.1441	0.9596
Ragi 1,5%	Hari ke-3	0.6960	2.5299	1.4472	1.7429	1.1919	0.9983
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.6041	2.3426	1.3003	1.5750	1.1318	0.9697
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.5973	2.3620	1.2573	1.5459	1.1125	0.9648
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.6416	2.3559	1.2834	1.5386	1.1585	1.0167
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.5759	2.3670	1.2201	1.5301	1.1005	0.9521
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.6593	2.3657	1.2822	1.5354	1.1759	1.0288
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.5334	2.2091	1.1225	1.4164	1.0316	0.9173
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.5823	2.2853	1.2375	1.5295	1.1042	0.9594
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.6486	2.4902	1.3619	1.6553	1.1855	1.0059
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.6005	2.3635	1.2663	1.5599	1.1233	0.9722
Ragi 1,5%	Hari ke-4	0.6309	2.3692	1.2736	1.5300	1.1385	1.0015
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.7966	2.3393	1.4135	1.5934	1.2306	1.1112
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.5273	1.6689	0.9733	1.1083	0.8533	0.8396
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.6336	2.1075	1.2321	1.4493	1.0661	0.9632
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.6378	2.1405	1.2554	1.4376	1.0638	0.9775
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.5671	1.8718	1.0915	1.2623	0.9466	0.8929
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.7229	2.1126	1.2896	1.4525	1.1411	1.0445
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.6221	2.0357	1.2273	1.3935	1.0275	0.9484
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.5938	1.9607	1.1570	1.3392	0.9930	0.9211

Sampel	Hari	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.6411	2.1428	1.2574	1.4731	1.0766	0.9718
Ragi 2,0%	Hari ke-1	0.7620	2.2049	1.3497	1.5217	1.1836	1.0809
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.5520	2.0872	1.1837	1.3429	1.0157	0.8883
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.5734	2.1428	1.2537	1.3944	1.0521	0.9134
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.6000	2.2050	1.2980	1.4706	1.0971	0.9243
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.5793	2.1610	1.2449	1.4311	1.0633	0.9080
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.5606	2.0524	1.1920	1.3453	1.0330	0.8935
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.4638	1.7089	0.9586	1.0760	0.8385	0.7817
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.5365	2.0472	1.1591	1.3159	0.9938	0.8758
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.5521	2.1064	1.1914	1.3688	1.0216	0.8926
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.5401	2.0466	1.1741	1.3180	0.9884	0.8757
Ragi 2,0%	Hari ke-2	0.5960	2.2635	1.2714	1.4659	1.0863	0.9252
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.6596	2.3815	1.3440	1.5938	1.1534	0.9853
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.7158	2.2990	1.3432	1.4562	1.0432	0.9274
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.6961	2.4173	1.3904	1.6226	1.1687	1.0012
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.7300	2.3051	1.3629	1.5084	1.0699	0.9339
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.6681	2.3919	1.3546	1.5865	1.1390	0.9811
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.7288	2.4421	1.3945	1.6310	1.1969	1.0211
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.6279	2.2431	1.2621	1.4688	1.0844	0.9619
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.6685	2.3872	1.3566	1.6357	1.1938	1.0006
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.6871	2.3580	1.3375	1.5676	1.1468	0.9970
Ragi 2,0%	Hari ke-3	0.6589	2.3650	1.3632	1.5974	1.1226	0.9570
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.6145	2.4515	1.2830	1.6736	1.1988	0.9953
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.5998	2.4977	1.2795	1.6629	1.1709	0.9703
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.5635	2.3577	1.1942	1.5747	1.1319	0.9481
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.6046	2.4796	1.3029	1.6591	1.1660	0.9675
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.5830	2.4138	1.2388	1.6260	1.1591	0.9547
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.6638	2.5586	1.3343	1.7941	1.3049	1.0462
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.5963	2.4830	1.2640	1.6617	1.1722	0.9698
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.5759	2.4032	1.2127	1.6069	1.1564	0.9591
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.6536	2.6094	1.3605	1.7931	1.2570	1.0220
Ragi 2,0%	Hari ke-4	0.5958	2.4639	1.2692	1.6541	1.1762	0.9703

Lampiran 4

Hasil Ekstraksi Fitur Data Pengujian Tapai Ketan

A. Nilai Hasil Ekstraksi Fitur Data Pertama (Fermentasi Tapai Ketan Hari ke-1)

Kode Sampel	Pengulangan	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
A1	1	2,262	23,372	9,128	12,512	8,626	11,132
A1	2	0,985	12,82	4,355	6,182	4,071	5,15
A1	3	1,313	7,187	3,272	4,462	3,204	3,399
A1	4	0,162	7,772	0,815	3,429	1,57	2,502
A1	5	2,119	20,459	10,743	14,436	6,952	6,719
A1	6	3,053	20,437	10,183	13,17	7,194	8,606
A1	7	1,938	15,12	7,384	10,073	5,572	6,374
A1	8	1,879	17,747	9,094	11,954	6,689	7,851
A1	9	1,572	16,465	8,149	10,87	6,235	6,783
A1	10	1,102	11,539	5,664	8,466	4,531	4,796
B1	1	2,003	27,743	9,03	16,446	8,9	8,816
B1	2	2,793	29,4	10,449	17,213	9,928	9,344
B1	3	2,366	30,388	10,704	16,528	9,4	9,713
B1	4	3,006	35,992	12,14	19,544	11,015	11,182
B1	5	2,834	32,339	11,157	18,06	9,805	10,221
B1	6	4,375	41,201	14,389	21,327	13,064	13,273
B1	7	3,449	40,031	14,247	22,187	12,407	12,134
B1	8	4,237	28,219	14,555	18,863	10,676	9,791
B1	9	4,495	34,785	17,42	22,695	12,36	10,505
B1	10	4,323	32,501	16,192	21,089	11,04	9,793
C1	1	7,886	53,558	26,493	34,737	19,271	17,108
C1	2	5,497	40,391	20,433	26,443	15,01	12,836
C1	3	7,881	53,733	26,961	35,22	19,584	16,748
C1	4	7,336	50,364	26,077	33,671	18,277	15,815
C1	5	7,241	51,338	25,363	33,607	18,202	15,296
C1	6	4,986	44,02	20,351	27,711	14,856	13,267
C1	7	6,018	49,131	23,925	32,063	17,758	14,798
C1	8	6,629	50,752	24,708	32,973	18,138	15,135
C1	9	5,585	46,215	22,277	30,106	16,508	13,78
C1	10	4,895	38,934	20,669	25,394	14,766	12,923
D1	1	8,572	56,154	28,799	38,608	22,075	16,358
D1	2	7,629	51,259	27,567	36,123	20,712	14,877
D1	3	9,415	54,615	29,14	36,89	22,785	16,49
D1	4	7,928	53,525	27,724	36,364	20,772	14,594
D1	5	8,512	56,431	28,858	38,773	22,102	15,669
D1	6	8,607	57,53	30,064	40,518	23,039	15,94
D1	7	8,14	55,733	28,66	38,827	22,257	15,794

Kode Sampel	Pengulangan	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
D1	8	6,422	48,157	24,59	33,708	18,869	13,618
D1	9	8,166	53,196	27,095	35,796	21,607	15,741
D1	10	8,207	52,52	28,064	32,81	21,869	16,009

B. Nilai Hasil Ekstraksi Fitur Data Kedua (Fermentasi Tapai Ketan Hari ke-2)

Kode Sampel	Pengulangan	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
A2	1	9,076	50,039	24,799	31,031	20,022	15,368
A2	2	9,582	58,175	30,668	32,965	19,652	17,717
A2	3	7,838	50,48	25,714	33,494	20,294	15,671
A2	4	6,956	49,715	24,064	33,375	19,128	14,771
A2	5	6,16	46,227	23,785	32,333	17,849	13,454
A2	6	6,407	46,816	23,434	32,664	17,555	13,671
A2	7	7,215	52,273	26,569	36,384	19,921	14,903
A2	8	6,011	43,603	23,01	31,505	17,56	12,38
A2	9	6,075	47,647	24,492	33,591	18,356	13,464
A2	10	6,494	50,419	25,095	33,093	19,223	13,967
B2	1	8,926	59,346	30,16	41,487	23,142	16,891
B2	2	8,55	58,334	30,596	40,074	22,921	15,926
B2	3	8,545	56,663	30,191	39,093	22,227	15,515
B2	4	8,201	56,204	28,917	38,42	21,904	15,256
B2	5	7,205	52,568	27,729	36,681	20,121	14,069
B2	6	7,445	53,426	28,411	37,872	21	14,311
B2	7	7,168	52,599	28,093	36,969	20,623	14,114
B2	8	7,593	54,977	28,481	38,089	20,95	14,592
B2	9	7,954	55,585	29,056	39,044	21,789	14,559
B2	10	7,649	55,739	28,417	38,574	21,645	15,237
C2	1	7,061	54,13	27,801	37,194	21,165	13,326
C2	2	6,221	49,012	24,901	33,228	18,87	13,162
C2	3	6,982	52,481	27,573	36,537	20,838	14,081
C2	4	5,971	48,469	25,094	34,024	19,062	13,189
C2	5	5,524	44,735	23,332	30,8	17,427	12,189
C2	6	6,065	46,323	24,917	32,662	18,803	12,969
C2	7	7,205	54,371	28,372	37,69	21,917	14,678
C2	8	6,325	46,821	24,64	32,777	19,156	12,869
C2	9	5,197	45,087	23,177	30,131	17,75	12,884
C2	10	5,704	47,159	24,292	31,938	18,282	13,055
D2	1	9,449	63,455	32,582	42,788	25,42	16,995
D2	2	8,004	57,478	29,761	39,388	23,586	15,225
D2	3	7,47	54,255	28,8	36,935	22,65	15,14
D2	4	7,18	54,028	28,351	36,401	22,182	14,832
D2	5	9,339	57,682	32,692	41,282	24,882	16,328

Kode Sampel	Pengulangan	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
D2	6	8,404	59,131	31,276	40,813	24,299	16,271
D2	7	8,53	57,876	30,648	40,164	23,796	15,572
D2	8	8,333	56,845	30,412	39,458	23,37	15,318
D2	9	8,553	58,108	31,06	39,159	23,908	16,275
D2	10	7,368	54,308	28,161	37,251	22,012	14,758

C. Nilai Hasil Ekstraksi Fitur Data Ketiga (Fermentasi Tapai Ketan Hari ke-3)

Kode Sampel	Pengulangan	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
A3	1	12,179	64,217	32,676	41,771	26,276	18,284
A3	2	12,509	66,047	33,649	43,027	26,3	18,216
A3	3	10,874	62,631	31,907	40,438	24,895	17,485
A3	4	9,246	58,434	29,023	37,189	22,015	16,377
A3	5	10,864	64,615	31,558	40,741	24,605	17,809
A3	6	9,327	61,472	29,219	38,087	23,205	16,796
A3	7	10,987	64,377	32,547	41,631	24,344	17,572
A3	8	9,031	59,284	29,088	37,601	22,384	15,998
A3	9	11,302	65,594	32,973	42,489	25,144	17,73
A3	10	9,117	57,716	28,745	37,495	21,857	15,864
B3	1	9,151	55,416	30,673	39,595	23,054	15,616
B3	2	9,968	61,249	33,014	43,465	24,543	16,471
B3	3	9,63	59,842	32,512	42,63	24,117	16,385
B3	4	11,631	68,527	34,783	46,034	26,623	17,737
B3	5	10,256	63,702	32,124	42,877	24,671	16,431
B3	6	10,807	64,097	33,982	44,709	25,628	17,645
B3	7	11,611	65,967	35,184	45,639	26,634	18,036
B3	8	11,724	63,82	34,561	45,184	26,541	17,461
B3	9	8,309	56,169	30,371	40,659	22,898	15,481
B3	10	9,25	60,14	32,596	43,114	24,395	16,316
C3	1	9,838	64,82	33,709	46,665	25,857	17,144
C3	2	9,911	61,839	33,829	45,859	25,322	16,73
C3	3	10,016	63,643	33,644	45,958	25,584	16,704
C3	4	9,538	61,688	33,574	45,139	25,468	16,195
C3	5	9,438	62,625	34,027	45,846	25,455	16,693
C3	6	9,966	62,99	33,881	46,038	25,845	16,373
C3	7	10,671	67,937	35,914	49,805	27,527	18,016
C3	8	11,089	66,47	36,179	49,317	27,524	17,448
C3	9	10,05	64,476	34,718	46,939	26,534	16,759
C3	10	10,463	64,536	34,989	47,965	26,664	16,796
D3	1	12,432	68,451	36,023	46,269	28,31	18,57
D3	2	11,848	65,559	34,69	45,397	26,581	18,235
D3	3	11,314	64,77	33,834	45,237	26,587	17,736

Kode Sampel	Pengulangan	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
D3	4	10,404	66,156	34,024	45,286	26,485	17,818
D3	5	10,449	62,314	33,184	43,573	25,188	17,002
D3	6	11,543	64,279	34,72	45,913	26,473	17,274
D3	7	11,14	61,321	34,165	44,25	25,763	16,644
D3	8	11,174	63,561	33,648	43,932	25,908	16,806
D3	9	11,038	67,242	34,566	47,232	27,833	18,073
D3	10	10,459	63,863	33,533	44,842	26,382	17,319

D. Nilai Hasil Ekstraksi Fitur Data Keempat (Fermentasi Tapai Ketan Hari ke-4)

Kode Sampel	Pengulangan	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
A4	1	10,304	70,895	31,952	45,156	27,327	19,502
A4	2	11,106	71,563	33,062	46,62	27,768	19,525
A4	3	11,049	71,99	33,958	46,898	28,123	19,407
A4	4	9,397	69,541	31,605	44,249	26,374	18,694
A4	5	10,245	67,961	32,956	46,279	27,093	19,21
A4	6	10,229	65,669	32,824	45,847	26,971	18,75
A4	7	9,388	66,061	30,904	45,278	26,741	18,261
A4	8	10,463	68,212	33,343	47,315	27,586	19,011
A4	9	8,784	65,03	31,477	44,654	25,931	18,033
A4	10	9,443	65,368	31,779	45,295	26,239	17,898
B4	1	7,642	60,933	28,277	42,263	23,993	17,165
B4	2	7,202	61,267	26,889	41,535	23,973	16,815
B4	3	8,02	62,28	30,328	43,481	24,822	17,395
B4	4	8,189	61,485	30,394	43,979	25,211	17,395
B4	5	7,842	61,403	29,951	43,445	24,864	17,18
B4	6	7,548	61,469	28,262	43,051	25,099	16,995
B4	7	7,587	61,628	29,021	42,934	24,988	17,195
B4	8	7,428	59,617	28,578	41,986	24,055	16,837
B4	9	7,469	60,926	27,759	42,573	24,527	16,909
B4	10	7,284	60,452	27,969	42,171	24,223	16,873
C4	1	10,764	62,987	30,701	42,548	27,738	18,696
C4	2	10,357	62,381	30,872	43,034	27,223	18,61
C4	3	9,675	62,82	30,428	42,207	26,587	18,248
C4	4	9,984	66,611	32,205	46,04	27,694	18,817
C4	5	9,96	65,831	32,006	45,687	26,887	18,583
C4	6	10,854	67,848	33,847	47,536	28,576	18,887
C4	7	8,954	64,75	31,154	44,393	25,997	17,898
C4	8	8,531	63,851	30,617	43,746	25,837	17,364
C4	9	9,123	63,406	32,268	45,063	26,256	17,708
C4	10	7,775	63,028	29,057	42,79	25,213	17,047
D4	1	9,76	69,713	32,402	49,802	28,723	18,337

Kode Sampel	Pengulangan	MQ-3	MQ-4	TGS-2610	MQ-137	MQ-136	TGS-822
D4	2	9,089	67,255	31,904	48,025	27,751	17,998
D4	3	9,029	68,13	32,374	48,154	27,86	17,543
D4	4	9,091	68,227	31,014	48,172	27,913	17,842
D4	5	8,528	68,563	30,002	47,835	27,42	17,647
D4	6	8,853	68,018	30,747	47,63	27,297	17,839
D4	7	9,544	71,099	31,314	50,027	29,473	18,759
D4	8	8,897	69,091	31,712	48,563	28,167	18,268
D4	9	8,204	66,608	30,191	46,787	27,164	17,521
D4	10	9,454	71,072	32,024	50,384	29,579	18,867



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG

Jalan Gajayana Nomor 50, Telepon (0341)551354, Fax. (0341) 572533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 19640051
Nama : HISYAM JAUHAR ATHIF
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : FISIKA
Dosen Pembimbing 1 : MUTHMAINNAH, M.Si
Dosen Pembimbing 2 : Drs. H.ABDUL BASID, M.Si
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : KLASIFIKASI AROMA VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOCs) PADA TAPAI KETAN SELAMA PROSES FERMENTASI BERBASIS ELECTRONIC NOSE

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	07 November 2025	MUTHMAINNAH, M.Si	Pengajuan Judul Skripsi	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
2	21 Januari 2026	MUTHMAINNAH, M.Si	Konsultasi Bab I, II, dan III	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
3	23 Januari 2026	MUTHMAINNAH, M.Si	Bab I, II, dan III disetujui	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
4	10 Februari 2026	MUTHMAINNAH, M.Si	Revisi Proposal Skripsi	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
5	11 Maret 2026	MUTHMAINNAH, M.Si	Konsultasi Pengambilan Data Penelitian	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
6	07 April 2026	MUTHMAINNAH, M.Si	Konsultasi Pengolahan Data Penelitian	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
7	20 April 2026	MUTHMAINNAH, M.Si	Konsultasi Bab IV	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
8	21 April 2026	MUTHMAINNAH, M.Si	Bab IV disetujui	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
9	23 April 2026	Drs. H.ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Integrasi Bab I dan II	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
10	24 April 2026	Drs. H.ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Integrasi Bab IV	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
11	27 April 2026	Drs. H.ABDUL BASID, M.Si	Revisi Integrasi Bab I, II, dan IV	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
12	27 April 2026	MUTHMAINNAH, M.Si	Bab V disetujui	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

Drs. H.ABDUL BASID, M.Si



Malang, 28 April 2026
Dosen Pembimbing 1

MUTHMAINNAH, M.Si