



Volatilomik Gelatin Ikan dan Babi dengan HS-SPME GC-MS untuk Autentikasi Halal

[*Volatilomics of Fish and Pork Gelatin Using HS-SPME GC-MS for Halal Authentication*]

Fadiah Nur Hanifati¹⁾, Feri Kusnandar^{1)*}, Noviyan Darmawan²⁾, Agy Wirabudi Pranata²⁾,
Nancy Dewi Yuliana¹⁾

¹⁾ Divisi Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknik dan Teknologi, IPB University, Bogor, Indonesia

²⁾ Halal Science Center, IPB University, Bogor, Indonesia

Received September 21st 2025 / Revised January 21st 2026 / Accepted February 2nd 2026

ABSTRACT

*Gelatin, derived from animal tissues, is a widely used ingredient in the food industry. Fish gelatin has gained attention as a halal alternative due to its abundance, favorable functional properties, and versatility in food applications. However, tracing the origin of gelatin remains challenging, highlighting the need for reliable authentication methods. Conventional analytical techniques are often limited by long analysis times, low specificity, inability to detect source-specific markers, high costs, and the requirement for sophisticated instruments. This study investigated the volatile compound profiles of commercial gelatin from various fish species (pangasius, tilapia skin, tuna skin, and cod) and compared them with commercial pork gelatin by using Headspace Solid-Phase Microextraction coupled with Gas Chromatography-Mass Spectrometry (HS-SPME GC-MS) combined with multivariate data analysis. The HS-SPME GC-MS approach effectively classified gelatin samples based on their volatile profiles. Partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) identified five key discriminant volatiles for pork gelatin (decane, boronic acid, ethyl-, bis(2,2-dimethylpropyl) ester, *m*-anisoyl amide, *N*-(2-phenylethyl)-*N*-decyl, 1-pentadecene, and 2-tetradecanone) and four for fish gelatin (hexadecane, 1,2-oxathiane, 6-dodecyl, 2,2-dioxide, *n*-tridecan-1-ol, and 9-nonadecene), with decane and hexadecane identified as the most influential markers for pork and fish gelatin, respectively.*

Keywords: authentication, fish gelatin, gas chromatography-mass spectrometry, solid phase microextraction, volatile compounds

ABSTRAK

Gelatin yang diperoleh dari jaringan hewan merupakan bahan intermediet yang banyak digunakan dalam industri pangan. Gelatin ikan semakin mendapat perhatian sebagai alternatif halal karena ketersediaannya yang melimpah, sifat fungsional yang menguntungkan, dan fleksibilitasnya dalam berbagai aplikasi pangan. Namun, penelusuran asal-usul gelatin masih menjadi tantangan, sehingga diperlukan metode autentikasi yang andal. Teknik analisis konvensional sering memiliki keterbatasan, seperti waktu analisis yang lama, spesifisitas rendah, ketidakmampuan untuk mendeteksi penanda spesifik sumber, biaya tinggi, dan membutuhkan instrumen yang canggih. Penelitian ini mengkaji profil senyawa volatil dari gelatin komersial yang berasal dari berbagai spesies ikan (ikan patin, kulit ikan nila, kulit ikan tuna, dan ikan cod) dan membandingkannya dengan gelatin babi komersial menggunakan *headspace solid-phase microextraction* yang dipadukan dengan *gas chromatography-mass spectrometry* (HS-SPME GC-MS) serta analisis data multivariat. Pendekatan HS-SPME GC-MS terbukti efektif dalam mengklasifikasikan sampel gelatin berdasarkan profil volatilnya. Pendekatan dengan *partial least squares-discriminant analysis* (PLS-DA) dapat mengidentifikasi lima senyawa volatil pembeda utama untuk gelatin babi (*decane*, *boronic acid*, *ethyl-*, *bis*(2,2-dimethylpropyl) *ester*, *m*-*anisoyl amide*, *N*-(2-phenylethyl)-*N*-decyl-, 1-pentadecene, dan 2-tetradecanone) dan empat senyawa volatil pembeda utama untuk gelatin ikan (*hexadecane*, 1,2-oxathiane, 6-dodecyl-, 2,2-dioxide, *n*-tridecan-1-ol, dan 9-nonadecene), dengan *decane* dan *hexadecane* diidentifikasi sebagai penanda paling berpengaruh untuk gelatin babi dan ikan.

Kata kunci: autentikasi, *gas chromatography-mass spectrometry*, gelatin ikan, senyawa volatil, *solid phase microextraction*

*Penulis Korespondensi: E-mail: fkusnandar@apps.ipb.ac.id

PENDAHULUAN

Gelatin merupakan bahan intermediet yang banyak digunakan dalam industri pangan maupun non-pangan karena sifat fungsionalnya, seperti kemampuan membentuk gel, menstabilkan, mengentalkan, mengikat air, dan berperan sebagai pengemulsi (emulsifier) dalam berbagai produk. Pemanfaatannya meliputi pangan (seperti permen jeli, marshmallow, yogurt), dan non-pangan (seperti kapsul dan produk kosmetik). Sumber bahan baku gelatin menjadi isu sensitif, terutama di negara dengan mayoritas penduduk Muslim seperti Indonesia, karena sebagian besar produksi global masih berasal dari kulit dan tulang babi. Menurut Report-Linker (2022), produksi gelatin dunia pada tahun 2020 mencapai 516,8 metrik ton dan diperkirakan meningkat menjadi 696,1 metrik ton pada tahun 2027, dengan 42,9% berasal dari kulit babi, 28,7% dari kulit sapi, 24,9% dari tulang hewan, dan sisanya dari bahan lainnya. Indonesia sendiri masih bergantung pada impor gelatin, yaitu lebih dari 1,4 juta kg per tahun, yang didatangkan dari negara produsen utama seperti Cina, India, Amerika Serikat, dan Jerman (BPS, 2019).

Gelatin ikan merupakan alternatif bahan intermediet halal yang menjanjikan, karena memanfaatkan limbah ikan seperti kulit, sisik, dan tulang (Usman *et al.*, 2022). Peneliti terdahulu telah melaporkan metode ekstraksi dan produksi gelatin dari berbagai spesies tuna dan makarel (Nurilmala *et al.*, 2020; Montero *et al.*, 2022), serta dari ikan patin, nila, dan tuna (Nurilmala *et al.*, 2017). Studi lain berfokus pada modifikasi proses gelatin ikan untuk meningkatkan kekuatan gel, stabilitas termal, dan sifat filmogenik agar sesuai untuk aplikasi sebagai penstabil produk susu, bahan enkapsulasi, dan *edible film* (Derkach *et al.*, 2020; Mezhoudi *et al.*, 2022; Fauzan *et al.*, 2023).

Perbedaan sumber kolagen yang digunakan sebagai bahan baku gelatin memberikan tantangan untuk mengembangkan metode autentikasi yang praktis, sensitif, dan cepat, untuk memastikan asal gelatin dalam produk pangan atau non-pangan (Fasya *et al.*, 2018). Gelatin diperoleh melalui hidrolisis parsial kolagen, protein struktural yang terdapat pada kulit, tulang, dan jaringan ikat hewan (Panjaitan, 2017). Sifat-sifat gelatin, termasuk karakteristik aromanya, sangat dipengaruhi oleh sumber kolagen yang digunakan. Aroma khas tiap jenis gelatin muncul dari senyawa volatil yang berasal dari bahan baku dan yang terperangkap selama proses produksi, sehingga setiap gelatin memiliki profil volatil unik yang dapat digunakan sebagai penanda autentikasi (Li *et al.*, 2025).

Berbagai metode autentikasi telah dikembangkan, seperti LC-MS/MS (Dewi *et al.*, 2023); ELISA (Tukiran *et al.*, 2016), *real-time PCR* (Habituraman *et al.*, 2023), FTIR (Zilhadia *et al.*, 2018; Fatmawati *et*

al., 2024) dan SPME-GC/MS (Amalia *et al.*, 2022). Namun, metode analisis tersebut masih memiliki keterbatasan, antara lain waktu analisis yang lama, kebutuhan instrumen canggih, kesulitan mendeteksi protein terdenaturasi, serta rendahnya spesifisitas (Mendez *et al.*, 2019). Salah satu pendekatan potensial adalah analisis volatilomik, yaitu pemetaan profil senyawa volatil untuk mengidentifikasi perbedaan sumber gelatin (Lyttou *et al.*, 2019; Hameed *et al.*, 2018).

Komposisi aroma gelatin bervariasi bergantung pada jenis hewan sumbernya, sehingga profil senyawa volatil dapat dimanfaatkan sebagai indikator untuk membedakan gelatin halal dan non-halal (Darmawan *et al.*, 2024). *Solid phase microextraction* (SPME) merupakan teknik ekstraksi yang memiliki beberapa mode, termasuk *direct immersion SPME* (DI-SPME), yaitu serat SPME kontak langsung dengan matriks sampel. Metode ini lebih sesuai untuk mengekstraksi senyawa yang kurang volatil, namun berpotensi membawa komponen matriks non-volatil ke permukaan serat sehingga memerlukan optimasi kondisi ekstraksi, seperti jenis serat, waktu, dan suhu.

Sebaliknya, *headspace solid phase microextraction* (HS-SPME) mengekstraksi senyawa dari fase gas (*headspace*) di atas sampel dan lebih sesuai untuk analisis aroma pada matriks pangan dan produk hewani karena selektif terhadap senyawa volatil dan semi-volatil serta meminimalkan interferensi matriks. Kombinasi HS-SPME dengan *gas chromatography-mass spectrometry* (GC-MS) memiliki keunggulan berupa sensitivitas tinggi, analisis cepat, dan tanpa penggunaan pelarut (Nugraha *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2023). Dibandingkan dengan *direct SPME*, metode HS-SPME lebih selektif terhadap senyawa volatil ringan, meskipun memiliki cakupan analit yang lebih terbatas.

Metode HS-SPME GC-MS telah banyak diterapkan pada berbagai matriks pangan, seperti daging babi cincang (Song *et al.*, 2021), daging sapi matang (Watanabe *et al.*, 2015), serta produk samping unggas, sapi, dan babi (Ahamed *et al.*, 2023), untuk memetakan profil volatil dan mengidentifikasi senyawa penanda spesifik. Selain itu, teknik ini juga digunakan pada tuna kaleng (Zhang *et al.*, 2019) dan pala kering (Sipahelut, 2019) untuk membedakan komposisi senyawa volatil antarspesies atau akibat perlakuan proses.

Penelitian ini bertujuan membandingkan profil senyawa volatil pada gelatin ikan (tuna, patin, nila, dan cod) dengan gelatin babi menggunakan metode HS-SPME GC-MS, sekaligus mengidentifikasi senyawa penanda spesifik yang dapat digunakan untuk autentikasi halal.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan berupa gelatin babi komersial (*Foodchem International Corporation*, Tiongkok), serta gelatin ikan yang berasal dari ikan patin, kulit ikan nila, kulit ikan tuna, dan ikan cod yang diperoleh dari Laboratorium Departemen Teknologi Hasil Perikanan, Institut Pertanian Bogor. Selain itu, etanol dan akuades juga digunakan sebagai bahan analisis.

Persiapan sampel dengan SPME

Persiapan sampel dilakukan dengan merujuk pada metode Pavlidis *et al.* (2019) dengan beberapa penyesuaian. Sebanyak 5 g gelatin ditimbang dan dimasukkan ke dalam vial berkapasitas 20 mL, kemudian ditambahkan 5 mL akuades dan 0,5 μ L etanol. Larutan tersebut dihomogenkan dengan cara menggoyangkan vial selama 2 menit. Sebelum digunakan, serat SPME (DVB/CAR/PDMS, Supelco, Bellefonte, PA, Amerika Serikat) dibersihkan terlebih dahulu dengan pemanasan pada injektor GC-MS pada suhu 250 °C selama 10 menit. Selanjutnya, dilakukan tahap pra-ekstraksi pada suhu 80 °C selama 3 jam menggunakan *hotplate*. Setelah itu, serat dipasang secara *headspace* pada vial selama 50 menit pada suhu yang sama.

Analisis identifikasi senyawa volatil dengan GC-MS

Hasil ekstraksi gelatin dianalisis menggunakan GC-MS. Helium (He) digunakan sebagai gas pembawa dengan laju alir konstan 1 mL/menit. Port injeksi dilengkapi dengan liner berdiameter 0,75 mm (Agilent) yang sesuai untuk analisis SPME, dan dioperasikan pada mode *splitless* dengan suhu 250 °C. Pemisahan senyawa dilakukan pada kolom kapiler Stabilwax berukuran 60 m $\times$ 0,25 mm dengan ketebalan film 0,25 μ m. Program suhu oven dimulai pada 35 °C (ditahan 1 menit), kemudian dinaikkan dengan laju 5 °C/menit hingga 70 °C, dilanjutkan dengan laju 10 °C/menit sampai 170 °C, lalu dinaikkan kembali hingga 250 °C dengan laju 3 °C/menit dan dipertahankan selama 7 menit. Suhu antarmuka ditetapkan pada 250 °C.

Spektrometer massa dijalankan dalam mode ionisasi elektron (EI) dengan energi 70 eV dan rentang pemindaian 25–500 m/z, sedangkan suhu sumber ion diatur pada 240 °C. Fiber SPME kemudian diinjeksi ke port injeksi GC-MS dengan menekan *start* pada instrumen, dan analisis dilakukan selama 51,67 menit. Setiap sampel dianalisis sebanyak lima ulangan. Profil senyawa volatil diidentifikasi berdasar pada *peak processing parameters* yang ditetapkan pada alat GC-MS diantaranya yaitu *peak integration*= 500, *slope*= 100/min, *width*= 1, *minimal area*= 0, *similarity*= 80% dan *retention index allowance*= $\pm$ 20.

Hasil analisis GC-MS diolah lebih lanjut dengan perangkat lunak Shimadzu GCMS Solution versi 4.45 untuk menyeleksi senyawa yang terdapat dalam sampel, kemudian dilanjutkan dengan proses identifikasi senyawa volatil. Semua analit senyawa volatil diperkirakan menggunakan *Library MS NIST 17.0* sebagai referensi spektrum massa. Selain itu, identifikasi juga diperkuat dengan perhitungan nilai indeks retensi linier (LRI). Nilai *Linear Retention Index* (LRI) dihitung secara otomatis oleh perangkat lunak dengan menggunakan waktu retensi standar alkana (C10–C26) yang disuntikkan ke GC-MS pada kolom serta kondisi yang sama dengan sampel analit. Selanjutnya, nilai LRI yang diperoleh dibandingkan dengan indeks retensi linier dari pustaka atau laporan sebelumnya (jika tersedia) untuk memperkuat validitas identifikasi senyawa.

Analisis klasifikasi senyawa volatil

Data GC-MS awalnya diubah dari format *file* (.QGD) menjadi (.txt), kemudian diimpor ke *Microsoft Excel* dan ditranspose agar sesuai dengan format analisis multivariat. Selanjutnya, dilakukan transformasi data dengan menghitung persentase *relative area* tiap senyawa untuk setiap sampel. Normalisasi dilakukan dengan pemusatan (*mean centering*) dan penskalaan otomatis (*autoscaling*) berdasarkan kolom untuk memastikan setiap variabel sebanding satu sama lain. Data kemudian diproses menggunakan filter *multiplicative signal correction* (MSC) untuk mengurangi *noise* yang tidak berhubungan dengan analit target (Eriksson *et al.*, 2006). Hasil pemrosesan menghasilkan matriks data berukuran 270 baris (senyawa volatil) dan 35 kolom (sampel). Selanjutnya, klasifikasi senyawa volatil dianalisis menggunakan model *principal component analysis* (PCA) dengan skala *unit-variance* (UV). PCA digunakan untuk mereduksi jumlah variabel pengamatan yang besar menjadi beberapa komponen utama, sehingga pola data dapat dijelaskan dengan lebih sederhana (Pratiwi dan Harjoko, 2023). Kinerja model PCA dievaluasi berdasarkan nilai koefisien prediktif Q²X, yang merepresentasikan kemampuan model dalam memprediksi data baru.

Model *partial least squares-discriminant analysis* (PLS-DA) digunakan untuk memperhalus pola klasifikasi dan menilai kemampuan diskriminatif antara kelas. Model ini divalidasi berdasarkan nilai R² (reproduktivitas model) dan Q², (daya prediksi model). Pada PCA, indikator tersebut ditunjukkan dengan R²X dan Q², sedangkan pada PLS-DA, R²Y menunjukkan *goodness of fit* dan Q²Y menunjukkan akurasi prediksi data (Pranata *et al.*, 2021).

Validasi kedua model menggunakan uji permutasi, dengan ketentuan bahwa nilai R²Y dan Q²Y pada model yang dipermutasi harus lebih rendah dibandingkan nilai pada model asli. Hasil validasi memungkinkan visualisasi dan pengelompokan

sampel berdasarkan profil senyawa volatil masing-masing. Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak SIMCA versi 16.0 (Sartorius-Umetrics, Umeå, Swedia), yang menggunakan prinsip *soft independent modeling of class analogy* (SIMCA) untuk mengelompokkan setiap sampel ke dalam kelas yang sesuai (Yulia *et al.*, 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi senyawa volatil

Berdasarkan analisis GC-MS, sejumlah senyawa volatil berhasil teridentifikasi pada sampel gelatin, yaitu: 83 senyawa pada gelatin babi komersial, 71 senyawa pada gelatin babi standar, 69 senyawa pada gelatin ikan komersial, 98 senyawa pada gelatin kulit ikan nila, 136 senyawa pada gelatin kulit ikan tuna, 72 senyawa pada gelatin ikan patin, dan 45 senyawa pada gelatin ikan cod (data tidak disajikan). Menurut Mariano dan Kim (2023), jumlah analit yang diekstrak oleh serat SPME dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk metode ekstraksi, suhu dan waktu ekstraksi, jenis sampel, jenis serat, parameter GC-MS, serta jenis kolom yang digunakan. Faktor lain seperti pengadukan, pH, dan volume sampel juga dapat memengaruhi jumlah analit yang diekstrak (Dadali *et al.*, 2019).

Gelatin dapat mengalami perubahan kimia selama penyimpanan, sehingga terjadi kombinasi senyawa volatil yang berperan dalam aroma khas tiap sampel. Hal ini mengakibatkan jumlah dan jenis senyawa volatil dapat berbeda di setiap sampel. Senyawa volatil yang terdeteksi pada gelatin ikan dan babi berasal dari berbagai golongan, antara lain aldehida, keton, asam, ester, hidrokarbon, aromatik, terpena, senyawa yang mengandung belerang, dan lainnya. Pada produk perikanan, senyawa volatil umumnya berasal dari aldehida, alkohol, keton, asam, dan hidrokarbon (Liu *et al.*, 2023), sedangkan pada daging babi, senyawa volatil yang teridentifikasi termasuk alkana, alkohol, aldehida turunan Maillard, aldehida turunan lipid, keton, furan, pirazin, dan senyawa yang mengandung belerang (Zhao *et al.*, 2017).

Komposisi senyawa volatil juga dipengaruhi oleh bahan baku gelatin, karena setiap jenis gelatin memiliki struktur kimia yang berbeda (Ahmad *et al.*, 2024). Secara umum, senyawa volatil terbentuk melalui berbagai reaksi, termasuk degradasi termal (Kosowska *et al.*, 2017). Dalam penelitian ini, senyawa volatil diklasifikasikan menjadi dua kelas, yaitu kelas 1 (gelatin babi) dan kelas 2 (gelatin ikan), dengan pengelompokan yang ditampilkan pada *Figure 1*. Jumlah senyawa volatil pada gelatin ikan lebih banyak dibandingkan gelatin babi. Kolagen ikan memiliki komposisi asam amino lebih bervariasi

dibandingkan kolagen mamalia seperti babi (Wang *et al.*, 2023).

Senyawa volatil umumnya terbentuk sebagai hasil dari oksidasi termal (Liu *et al.*, 2023). Ikan memiliki kadar prolin dan hidroksiprolin yang berbeda dibandingkan babi. Kedua asam amino ini berperan dalam menstabilkan konformasi gelatin, sehingga gelatin ikan lebih mudah terdenaturasi pada suhu rendah. Proses denaturasi ini menyebabkan gelatin membentuk gel, yang melepaskan konsentrasi senyawa volatil lebih tinggi dibandingkan gelatin dalam bentuk utuh atau keras (Gao *et al.*, 2024). Pada penelitian ini, golongan senyawa yang paling dominan pada kedua kelas adalah hidrokarbon, ester, dan alkohol.

Klasifikasi senyawa volatil

Hasil PCA dengan tujuh komponen utama menjelaskan 62,3% total keragaman data ($R^2X=0,627$) dengan parameter prediktif ($Q^2=0,474$), yang diperoleh melalui *Hotelling's T²* pada interval kepercayaan 95%. Nilai ini memenuhi persyaratan minimum model, yaitu $Q^2 \geq 0,41$ (Worley dan Powers, 2016). Prinsip dasar PCA adalah menyusun komponen utama berupa kombinasi linear dari variabel asli, yang dirancang untuk menangkap variasi terbesar dalam data (Miller dan Miller, 2000). Komponen utama pertama (PC1) menjelaskan 53,3% keragaman, sedangkan PC2 menjelaskan 9%, sehingga kedua komponen secara bersama mewakili 62,3% keragaman dan dianggap paling berpengaruh dalam klasifikasi sampel. *Score-plot* PCA untuk gelatin ditampilkan pada *Figure 2*.

Hasil *score-plot* menunjukkan bahwa sampel gelatin ikan membentuk kluster terpisah dari gelatin babi. Setiap titik pada plot mewakili satu sampel, dan sampel dengan kemiripan profil volatil cenderung membentuk kluster yang sama. Gelatin kulit ikan tuna tampak paling terpisah dari sampel lainnya, sesuai dengan Zhang *et al.* (2019) yang melaporkan bahwa ikan tuna memiliki senyawa volatil penanda dari golongan hidrokarbon, yaitu *decanal*, yang memberikan aroma dominan dengan *relative odor activity value* (ROAV) tertinggi. Selain itu, gelatin tuna memiliki jumlah senyawa keton yang lebih banyak dibandingkan sampel lain, memperkuat perbedaan profil volatilnya.

Kluster gelatin ikan patin juga membentuk kelompok terpisah, sejalan dengan Pratama (2018) yang mengidentifikasi lima senyawa volatil dominan pada ikan patin: *hexadecane*, *hexanal*, *1-octen-3-ol*, *2,3-octanedione*, dan *nonanal*, dengan proporsi tertinggi berasal dari *hexadecane*. Gelatin ikan patin menunjukkan kedekatan dengan gelatin ikan komersial, kemungkinan karena bahan baku komersial menggunakan ikan patin.

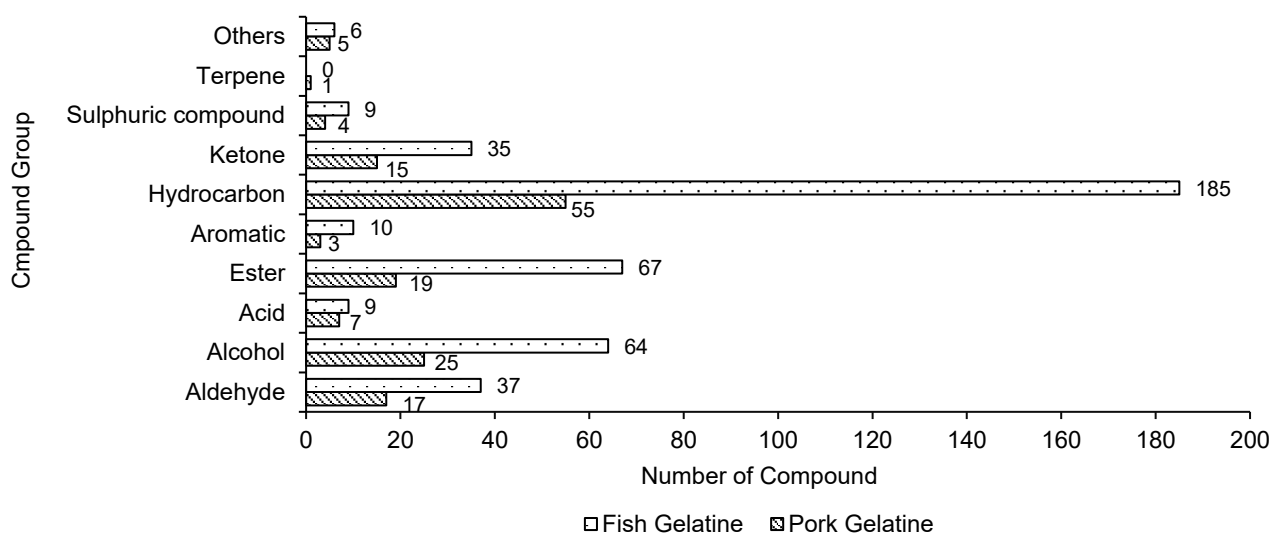
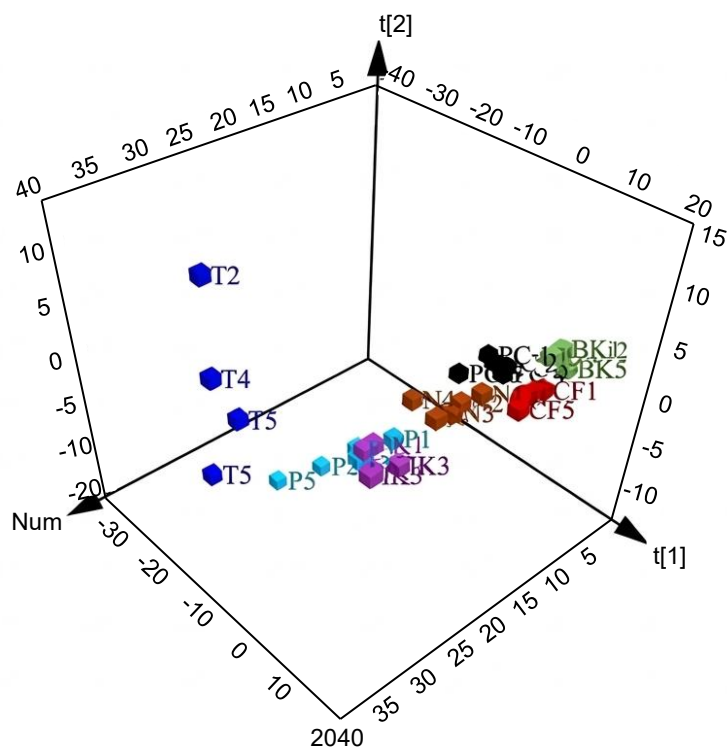


Figure 1. Composition of volatile compounds in fish and pork gelatin analyzed by HS-SPME GC-MS



Note: BK= Commercial pork, PC= Standard pork, IK= Commercial fish, T= Tuna, P= Pangasius, N= Nile tilapia, CF= Cod

Figure 2. PCA score plot of volatile compounds of fish and pork gelatin ($R^2X = 0.627$)

Gelatin kulit ikan nila membentuk kluster sendiri, dengan senyawa volatil dominan berupa *hexanal*, *6-methyl-3-heptanone*, *nonanal*, *heptanal*, dan *2-decanone*. Dari senyawa volatil tersebut, *hexanal* merupakan komponen yang paling banyak (Pratama, 2018). Sebaliknya, gelatin ikan cod terlihat lebih dekat dengan gelatin babi, kemungkinan karena adanya kesamaan senyawa volatil dominan. Penelitian sebelumnya menunjukkan senyawa volatil

dominan pada ikan cod antara lain *hydrogen sulfide*, *carbon disulfide*, *dimethyl sulfide*, *acetaldehyde*, *propionaldehyde*, *butyraldehyde*, *methylene chloride*, *ethanol*, *dimethyl ketone*, dan *methyl ethyl ketone*. (Martin et al., 2023), sedangkan pada daging babi senyawa dominan adalah *2-nonanone* dan *pentanal*, yang diprediksi sebagai senyawa penanda (*marker*) (Pranata et al., 2021).

Model multivariat PLS-DA

Analisis senyawa volatil gelatin juga dilakukan menggunakan model PLS-DA. Metode ini termasuk dalam teknik kemometri yang menghubungkan dua matriks, yaitu variabel X (data sampel) dan variabel Y (kelas), sehingga mampu memaksimalkan pemisahan antar kelompok sampel (Gromski *et al.*, 2015). Dibandingkan dengan PCA, PLS-DA memberikan pola klasifikasi yang lebih tegas. Penggunaan PLS-DA direkomendasikan apabila *score plot* dari PCA menghasilkan nilai koefisien prediksi model (Q^2) setidaknya 0,4 (Worley dan Powers, 2016).

Table 1 menunjukkan komponen volatil dengan koefisien korelasi tertinggi berdasarkan analisis PLS-DA untuk membedakan gelatin babi dan gelatin ikan. Pada kelas 1 (gelatin babi), senyawa dengan korelasi positif tertinggi adalah *decane* (0,0071), diikuti oleh *boronic acid, ethyl-, bis(2,2-dimethylpropyl) ester* (0,0066) dan *m-anisoyl amide, N-(2-phenylethyl)-N-decyl-* (0,0048). Senyawa lain seperti *1-pentadecene*, *2-tetradecanone*, *(R)-(-)-(Z)-14-methyl-8-hexadecen-1-ol*, *2-hexyl-1-octanol*, *pentanoic acid ester*, *n-heptadecanol-1*, dan *undecane, 5-methyl-* juga menunjukkan kontribusi positif meskipun dengan nilai korelasi yang lebih rendah (0,0030–0,0040). Sementara itu, pada kelas 2 (gelatin ikan), komponen volatil dengan korelasi positif tertinggi adalah *hexadecane* (0,0036), diikuti oleh *1,2-oxathiane*, *6-dodecyl-, 2,2-dioxide* (0,0031), *n-tridecan-1-ol* (0,0029), dan *9-nonadecene* (0,0027).

Table 1. Volatile component with the highest correlation coefficient

Component with Positive Correlation	Correlation Coefficient
PLS-DA (Pork gelatin)	
Decane	0.0071
Boronic acid, ethyl-, bis(2,2-dimethylpropyl) ester	0.0066
m-Anisoyl amide, N-(2-phenylethyl)-N-decyl-	0.0048
1-Pentadecene	0.0040
2-Tetradecanone	0.0035
(R)-(-)-(Z)-14-Methyl-8-hexadecen-1-ol	0.0035
2-Hexyl-1-octanol	0.0034
Pentanoic acid, 4-methyl-, 3,7-dimethyl-6-octenyl ester	0.0033
n-Heptadecan-1-ol	0.0032
Undecane, 5-methyl-	0.0030
PLS-DA (Fish gelatin)	
Hexadecane	0.0036
1,2-Oxathiane, 6-dodecyl-, 2,2-dioxide	0.0031
n-Tridecan-1-ol	0.0029
9-Nonadecene	0.0027

Hasil analisis data senyawa volatil gelatin menggunakan model PLS-DA dengan lima komponen utama dan dua kelas (kelas 1: gelatin babi, kelas 2: gelatin ikan) menjelaskan 71,6% variabilitas kumulatif ($R^2Y = 0,948$) dengan parameter prediksi ($Q^2 = 0,851$). *Score-plot* PLS-DA ditampilkan pada Figure 3. Model

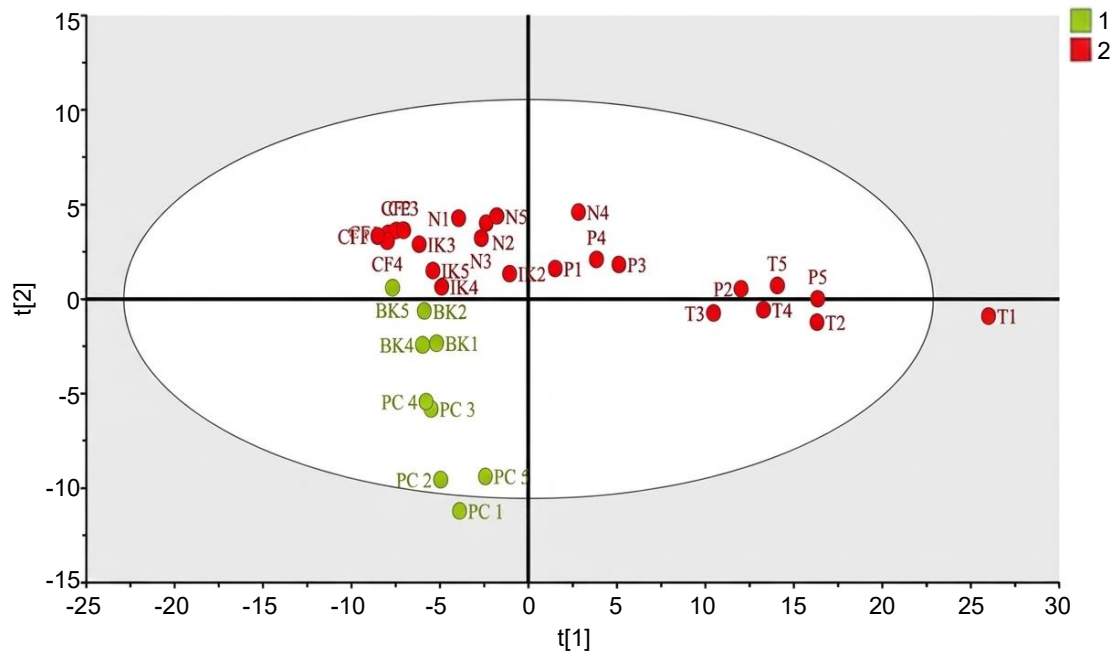
ini berhasil membedakan gelatin babi dan gelatin ikan (posisi titik data sampel berada pada kuadran yang berbeda). Jarak antar-kuadran menunjukkan tingkat kemiripan antar-sampel, yaitu semakin besar jarak antar-titik, maka semakin rendah tingkat kesamaannya. Dengan demikian, gelatin ikan dan gelatin babi menunjukkan profil senyawa volatil yang berbeda secara signifikan.

Interpretasi *score-plot* PLS-DA dapat dilakukan melalui *loading plot* (Figure 4), yang menunjukkan komponen volatil dominan pada masing-masing kelas. Posisi komponen volatil pada *loading plot* sesuai dengan posisi sampel pada *score-plot*. Secara keseluruhan, terdapat lima senyawa volatil dominan pada kelompok gelatin babi, yaitu *2-nonen-1-ol*, *3-tetradecyn-1-ol*, *cycloundecane*, *1,1,2-trimethyl-, cyclohexan*, dan *1-butenylidene*. Sementara pada kelompok gelatin ikan, senyawa volatil dominan meliputi *n-decyl methylphosphonofluoridate*, *decanoic acid*, *silver (1+) salt*, *1-methyl-1-silacyclobutane*, *S-hydroxythiobenzoate*, *undecanoic acid*, dan *isopropyl ester*. Identifikasi senyawa volatil dominan melalui *loading plot* ini bersifat visual dan terbatas. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis lanjutan menggunakan koefisien korelasi dan nilai *variable importance in the projection* (VIP) untuk memastikan peran masing-masing senyawa dalam klasifikasi sampel.

Senyawa volatil penanda

Pemilihan senyawa volatil yang paling berpengaruh pada masing-masing kelas PLS-DA dilakukan terlebih dahulu menggunakan *coefficient plot*. *Coefficient plot* memberikan nilai koefisien korelasi, baik positif maupun negatif, terhadap senyawa volatil yang teridentifikasi pada tiap kelas (Eriksson *et al.*, 2006). Koefisien korelasi positif terbesar menunjukkan komponen volatil yang paling dominan dalam kelas, sedangkan koefisien negatif menunjukkan pengaruh sebaliknya.

Sepuluh komponen penciri dipilih pada kelas 1 (gelatin babi) berdasarkan nilai koefisien positif terbesar dan *error bar* yang tidak memotong sumbu X. Pada kelas 2 (gelatin ikan), terdapat empat komponen penciri yang memenuhi kriteria yang sama. Komponen penciri terpilih disajikan pada Table 2. Setelah pemilihan komponen menggunakan *coefficient plot*, senyawa divalidasi melalui *VIP plot*. *VIP plot* menunjukkan nilai VIP, yang digunakan untuk menilai kontribusi masing-masing variabel terhadap model. Semakin tinggi nilai VIP suatu variabel, semakin besar pengaruhnya dalam klasifikasi (Kuswari *et al.*, 2020). Variabel yang dipilih dalam penelitian ini adalah yang berkorelasi positif dengan $VIP > 1$, meskipun dalam beberapa kasus $VIP > 0,5$ juga dapat diterima (Juliani *et al.*, 2016). Pemilihan senyawa ini berfungsi sebagai penanda (*marker*) untuk setiap kelas PLS-DA.



Note: BK= Commercial pork, PC= Standard pork, IK= Commercial fish, T= Tuna, P= Pangasius, N= Nile tilapia, CF= Cod

Figure 3. PLS-DA score plot of fish and pork gelatin ($R^2X = 0.627$)

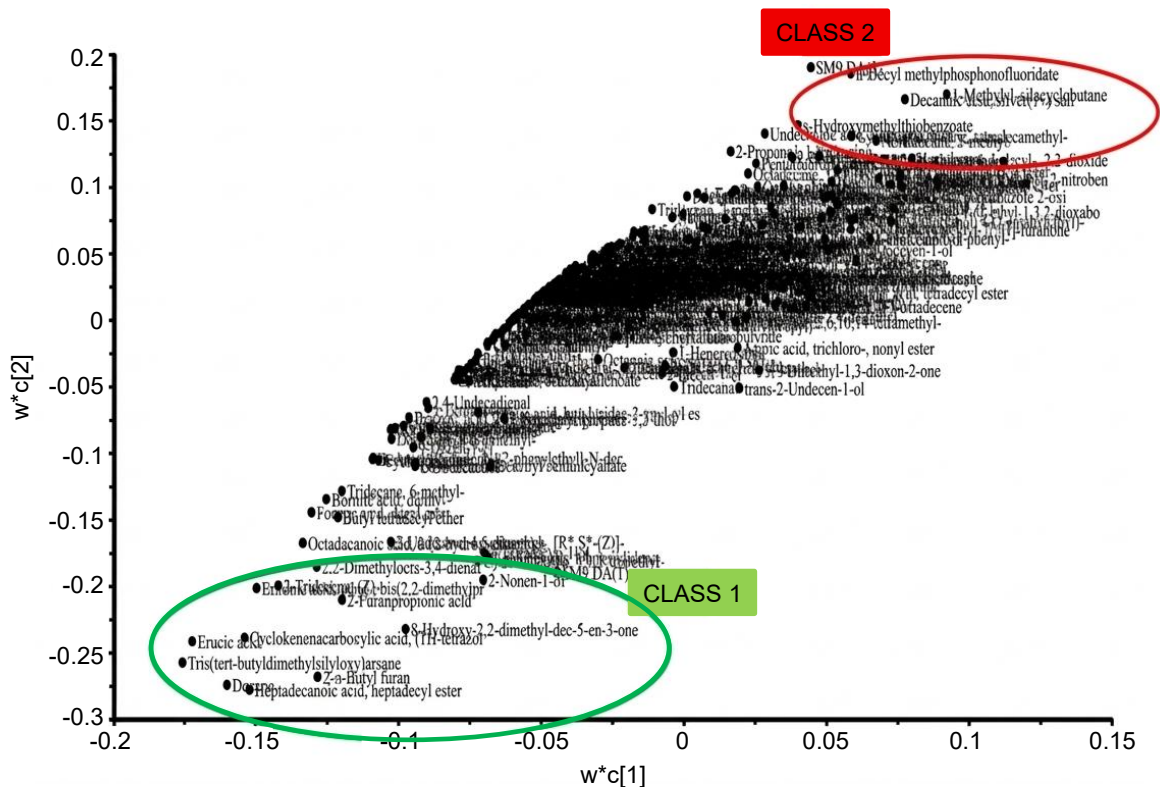


Figure 4. PLS-DA loading plot of fish and pork gelatin. Class 1 (dominant volatile compounds in pork gelatin: 2-nonen-1-ol, 3-tetradecyn-1-ol, cycloundecane, 1,1,2-trimethyl-, cyclohexan, dan 1-butenylidene); Class 2 (dominant volatile compounds in fish gelatin: n-decyl methylphosphonofluoridate, decanoic acid, silver (1+) salt, 1-methyl-1-silacyclobutane, S-hydroxythiobenzoate, undecanoic acid, dan isopropyl ester)

Table 2. Validated volatile component with the highest VIP value

Positive Component	VIP	Group
PLS-DA (Pork gelatin)		
Decane	2.68	Hydrocarbon
Boronic acid, ethyl-, bis(2,2-dimethylpropyl) ester	2.51	Ester
m-Anisoyl amide, N-(2-phenylethyl)-N-decyl-	1.82	Amide
1-Pentadecene	1.50	Hydrocarbon
2-Tetradecanone	1.34	Ketone
PLS-DA (Fish gelatin)		
Hexadecane	1.34	Hydrocarbon
1,2-Oxathiane, 6-dodecyl-, 2,2-dioxide	1.18	Sulphure
n-Tridecan-1-ol	1.09	Alcohol
9-Nonadecene	1.01	Hydrocarbon

Pada kelas 1 (gelatin babi), teridentifikasi lima senyawa volatil dengan koefisien korelasi positif dan nilai VIP tertinggi, yaitu *decane*, *ethyl-, bis(2,2-dimethylpropyl) ester*, *m-anisoyl amide*, *N-(2-phenylethyl)-N-decyl-*, *1-pentadecene*, dan *2-tetradecanone*. Senyawa-senyawa ini belum pernah secara spesifik dilaporkan pada gelatin babi, meski-pun sebagian telah ditemukan pada bahan baku daging babi. Misalnya, *1-pentadecene* terdeteksi pada daging babi hasil iradiasi (Kong *et al.*, 2017), dan *2-tetradecanone* pada daging babi yang dimasak (Ahamed *et al.*, 2023). Sementara itu, *ethyl-, bis(2,2-dimethylpropyl) ester* dan *m-anisoyl amide, N-(2-phenylethyl)-N-decyl-* diduga berasal dari turunan aldehida, alkohol, atau asam.

Pada kelas 2 (gelatin ikan), empat senyawa volatil dominan dengan VIP tertinggi adalah *hexadecane*, *1,2-oxathiane, 6-dodecyl-, 2,2-dioxide, n-tridecan-1-ol*, dan *9-nonadecene*. Beberapa senyawa ini telah dilaporkan sebelumnya, misalnya *n-tridecan-1-ol* pada gelatin ikan (Sae-leaw dan Benjakul, 2015), dan pada fillet ikan dengan *odor active value* tinggi (Ma *et al.*, 2020). Senyawa *1,2-oxathiane, 6-dodecyl-*, dan *2,2-dioxide* merupakan senyawa yang mengandung sulfur, yang dikenal memiliki ambang bau rendah dan kontribusi besar terhadap aroma daging, sedangkan *9-nonadecene* belum pernah dilaporkan pada gelatin ikan atau bahan bakunya.

Senyawa volatil yang dipilih ini ditetapkan sebagai marker pada masing-masing kelas. Dalam kelas 1, *decane* merupakan pembeda paling kuat karena memiliki nilai VIP tertinggi, sedangkan pada kelas 2, *hexadecane* menjadi senyawa diskriminator terkuat.

Uji permutasi model

Uji permutasi digunakan untuk memvalidasi model statistik berbasis pengacakan dengan cara merotasi data secara acak pada matriks kovarian. Validasi ini dilakukan untuk menghindari terjadinya *overfitting*, yaitu kondisi ketika model terlalu sesuai dengan data latih sehingga kinerjanya menurun saat diterapkan pada data baru. Melalui uji permutasi, prediksi senyawa volatil pada sampel yang belum

diketahui dapat dilakukan berdasarkan kelasnya (Pavlidis *et al.*, 2019).

Hasil uji permutasi model PLS-DA pada sampel gelatin ditampilkan pada Figure 5. Validasi dilakukan menggunakan 35 permutasi acak, yang pada *dataset* berukuran kecil hingga sedang dianggap cukup untuk menilai stabilitas model. Meskipun jumlah permutasi yang lebih banyak dapat meningkatkan keyakinan terhadap validitas model, penggunaan 35 permutasi masih diterima karena nilai R^2Y (lingkaran hijau) dan Q^2Y (kotak biru) pada titik uji (pojok kiri bawah) lebih rendah dibandingkan nilai R^2Y dan Q^2Y asli (pojok kanan atas), yang menegaskan stabilitas model dan menunjukkan tidak terjadinya *overfitting* (Song *et al.*, 2021).

Validasi model juga dilakukan melalui CV-ANOVA, yang menunjukkan reliabilitas model dengan nilai $p = 1,94129 \times 10^{-6}$, yang jauh lebih kecil dari batas $p < 0,05$ (Eriksson *et al.*, 2006). Dengan demikian, model PLS-DA dianggap handal dan dapat digunakan untuk interpretasi dan prediksi klasifikasi sampel berdasarkan senyawa volatilnya.

KESIMPULAN

Metode HS-SPME GC-MS dapat mengklasifikasi gelatin berdasarkan profil senyawa volatil dari sampel gelatin babi dan ikan. Analisis dengan model PLS-DA dapat mengidentifikasi lima senyawa volatil pembeda utama untuk gelatin babi (*decane*, *ethyl-, bis(2,2-dimethylpropyl) ester*, *m-anisoyl amide, N-(2-phenylethyl)-N-decyl-*, *1-pentadecene*, dan *2-tetradecanone*), dan empat senyawa volatil pembeda utama untuk gelatin ikan (*hexadecane*, *1,2-oxathiane, 6-dodecyl-, 2,2-dioxide, n-tridecan-1-ol*, dan *9-nonadecene*). Senyawa penanda yang paling berpengaruh untuk gelatin babi adalah *decane*, sedangkan untuk gelatin ikan adalah *hexadecane*. Analisis lebih lanjut dapat dilakukan dengan menggunakan teknik kromatografi gas-olfaktometri (GC-O) atau metode analisis volatil lain yang lebih sensitif untuk memperkuat validitas senyawa penanda tersebut.

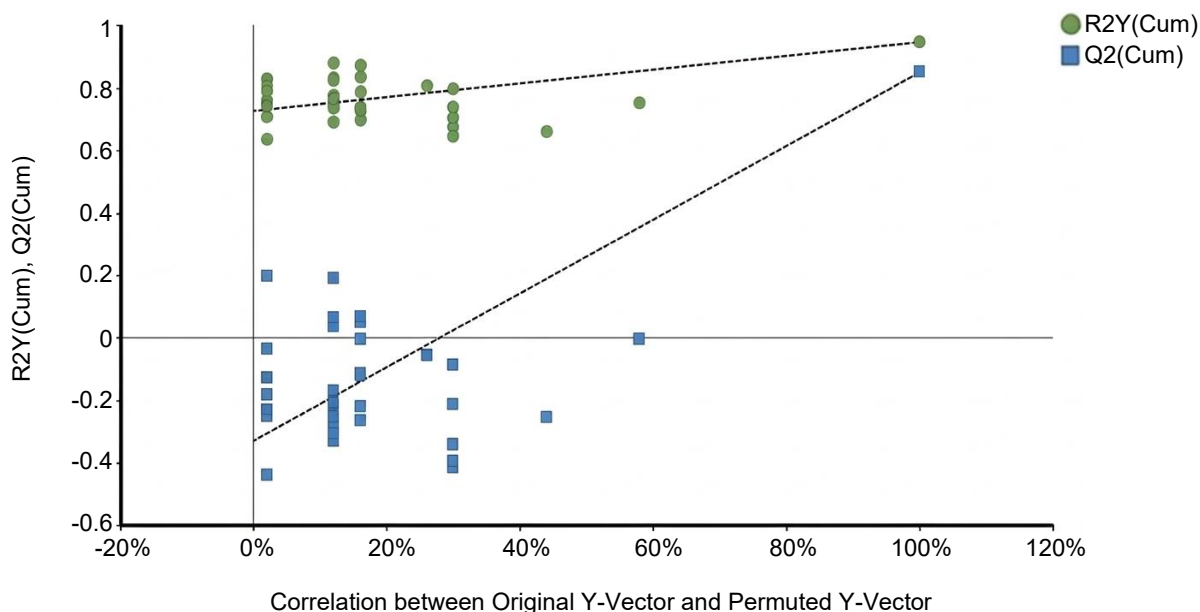


Figure 5. Permutation test of PLS-DA model

DAFTAR PUSTAKA

- Ahamed, Z., Seo, J.-K., Eom, J.-U., & Yang, H.-S. (2023). Optimasi ekstraksi senyawa volatil pada daging yang dimasak menggunakan HS-SPME-GC-MS, dan evaluasi identifikasi spesies daging menggunakan senyawa volatil melalui analisis data multivariat. *LWT-Food Science and Technology*, 188, 115374. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115374>
- Ahmad, M. I., Li, Y., Pan, J., Liu, F., Dai, H., Fu, Y., Huang, T., Farooq, S., & Zhang, H. (2024). Collagen and gelatin: Structure, properties, and applications in food industry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254(Part 3), 128037. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128037>
- Amalia, L., Yuliana, N. D., Sugita, P., Arofah, D., Syafitri, U. D., Windarsih, A., Rohman, A., Dachriyanus, B., Bakar, N. K. A., & Kusnandar, F. (2022). Volatile compounds, texture, and color characterization of meatballs made from beef, rat, wild boar, and their mixtures. *Heliyon*, 8, e10882. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10882>
- BPS. (2019). *Statistik Indonesia 2019*. Badan Pusat Statistik. <https://www.bps.go.id>
- Dadali, C., & Elmaci, Y. (2019). Optimization of head-space-solid phase microextraction (HS-SPME) technique for the analysis of volatile compounds of margarine. *Journal of Food Science and Technology*, 56(11), 4834–4843. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03945-w>
- Darmawan, N., Nurjanah, S., Yuliana, N. D., & Fardiaz, D. (2024). Porcine, bovine, and mixed gelatin identification using SPME-GC-MS and chemometrics. *Halal Studies and Society*, 4(1), 39–47. <https://doi.org/10.29244/hass.1.3.15-19>
- Derkach, S. R., Voron'ko, N. G., Kuchina, Y. A., & Kolotova, D. S. (2020). Modified fish gelatin as an alternative to mammalian gelatin in modern food technologies. *Polymers*, 12(12), 3051. <https://doi.org/10.3390/polym12123051>
- Dewi, K. R., Kusnandar, F., Yuliana, N. D., Ismayati, M., Solihat, N. N., Riantana, H., & Heryani. (2023). Application of LC-MS/MS coupled with various digestion methods for the identification of porcine gelatin markers in confectionery matrices. *Indonesian Journal of Halal Research*, 5(2), 53–66. <https://doi.org/10.15575/ijhar.v5i2.21191>
- Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Trygg, J., Wikström, C., & Wold, S. (2006). *Multi- and megavariate data analysis: Principles and applications* (2nd ed.). Umetrics Academy.
- Fasya, A. G., Amalia, S., Imamudin, M., Nugraha, R. P., Ni'mah, N., & Yuliani, D. (2018). Optimasi produksi gelatin halal dari tulang ayam broiler (*Gallus domesticus*) dengan variasi lama perendaman dan konsentrasi asam klorida (HCl). *Indonesian Journal of Halal*, 1(1), 102–108.

- Fatmawati, S., Hariyanti, H., Permanasari, E. D., & Chandra, A. (2024). Determination of gelatin from marshmallows using a combination of Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR) spectroscopic and chemometrics for halal authentication. *Journal of Halal Science and Research*, 5(2), 149–155. <https://doi.org/10.12928/jhsr.v5i2.10537>
- Fauzan, H. R., Ningrum, A., & Supriyadi, S. (2023). Evaluation of a fish gelatin-based edible film incorporated with *Ficus carica* L. leaf extract as active packaging. *Gels*, 9(11), 918. <https://doi.org/10.3390/gels9110918>
- Gao, Y., Liu, R., & Liang, H. (2024). Food hydrocolloids: Structure, properties, and applications. *Foods*, 13(7), 1077. <https://doi.org/10.3390/foods13071077>
- Gromski, P. S., Muhamadali, H., Ellis, D. I., Xu, Y., Correa, E., Turner, M. L., & Goodacre, R. (2015). A tutorial review: Metabolomics and partial least squares-discriminant analysis – A marriage of convenience or a shotgun wedding. *Analytica Chimica Acta*, 879, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.02.012>
- Habituuraman, S. N., Kusnandar, F., Yuliana, N. D., & Heryani. (2023). Sensitivitas real-time polimerase chain reaction dengan primer Tanabe dalam mendeteksi gelatin babi pada confectiionery. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 34(1), 119–126. <https://doi.org/10.6066/jtip.2023.34.1.119>
- Hameed, A. M., Asiyanbi-H, T., Idris, M., Fadzillah, N., & Mirghani, M. E. S. (2018). A review of gelatin source authentication methods. *Tropical Life Sciences Research*, 29(2), 213–227. <https://doi.org/10.21315/tlsr2018.29.2.15>
- Juliani, Y., Yuliana, N. D., Budijanto, S., Wijaya, C. H., & Khatib, A. (2016). Senyawa inhibitor glikosidasi dan antioksidan dari kumis kucing dengan pendekatan metabolomik berbasis FTIR. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 27(1), 17–30. <https://doi.org/10.6066/jtip.2016.27.1.17>
- Kong, Q., Yan, W., Yue, L., Chen, Z., Wang, H., Qi, W., & He, X. (2017). Volatile compounds and odor traits of dry-cured ham (*Prosciutto crudo*) irradiated by electron beam and gamma rays. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.09.008>
- Kosowska, M., Majcher, M. A., & Fortuna, T. (2017). Volatile compounds in meat and meat products. *Food Science and Technology*, 37(1), 1–7. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.08416>
- Kuswari, H., Afendi, F. M., & Notodiputro, K. A. (2020). Metode analisis diskriminan kuadrat terkecil parsial untuk klasifikasi segmen loyalitas konsumen susu pertumbuhan. *Indonesian Journal of Statistics and Its Applications*, 4(2), 284–295.
- Li, H., Lu, X., Pang, C., Liang, R., Pan, S., Wei, F., & Guo, X. (2025). The characterization of physicochemical, nutritional, and flavor properties of bovine hide gelatin prepared from different raw materials. *Foods*, 14(17), 2941. <https://doi.org/10.3390/foods14172941>
- Liu, L., Liu, C., Dou, S., & Dong, L. (2023). Volatile metabolite profiling of linolenic acid oxidation in the heating process. *Food Science and Technology*, 43, e121622. <https://doi.org/10.1590/fst.121622>
- <https://www.reportlinker.com/report-summary/search/726438?keywords=Gelatin+Export>
- Lytou, A. E., Panagou, E. Z., & Nychas, G. J. E. (2019). Volatilomics for food quality and authentication. *Current Opinion in Food Science*, 28, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.10.003>
- Ma, R., Liu, X., Tian, H., Han, B., Li, Y., Tang, C., Zhu, K., Li, C., & Meng, Y. (2020). Odor-active volatile compounds profile of triploid rainbow trout with different marketable sizes. *Aquaculture Reports*, 17, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100312>
- Mariano Jr, E., & Kim, Y. H. (2023). A review on the applicability of conventional meat authentication methods to cultured meat. *Food Science of Animal Resources*, 43(6), 1055–1071. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2023.e48>
- Martin, D., Joly, C., Dupas-Farrugia, C., Adt, I., Oulahal, N., & Degraeve, P. (2023). Volatilome analysis and evolution in the headspace of packed refrigerated fish. *Foods*, 12(14), 2657. <https://doi.org/10.3390/foods12142657>
- Mendez, J., Mendoza, L., Cruz-Tirado, J. P., & Quevedo, R. (2019). Trends in application of NIR and hyperspectral imaging for food authentication. *Scientia Agropecuaria*, 10(1), 143–161. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.01.16>
- Mezhoudi, M., Salem, A., Abdelhedi, O., Fakhfakh, N., Mabrouk, M., Khorchani, T., Debeaufort, F., Jridi, M., & Zouari, N. (2022). Development of active edible coatings based on fish gelatin enriched with *Moringa oleifera* extract: Application in fish (*Mustelus mustelus*) fillet preservation. *Food Science & Nutrition*, 10(11), 3979–3992. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2993>
- Miller, J. N., & Miller, J. C. (2000). *Statistics and chemometrics for analytical chemistry* (4th ed.). Pearson Education.

- Montero Barrantes, M., & Acosta, O. (2020). Tuna skin gelatin production: Optimization of extraction steps and process scale-up. *CYTA – Journal of Food*, 18(1), 580–590. <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1801849>
- Nurilmala, M., Adinugraha, S. C., Jacob, A. M., & Susilawati, S. (2020). Evaluation of the properties of tuna skin gelatin as a hard capsule material. *Fisheries Science*, 86(5), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12562-020-01457-7>
- Nurilmala, M., & Nasirullah, M. T. (2021). Karakteristik fisik-kimia gelatin dari kulit ikan patin, ikan nila, dan ikan tuna. *Jurnal Perikanan*, 23(1), 71–80. <https://doi.org/10.22146/jfs.59960>
- Nugraha, I. M., Prayascita, P. W., Dwidhanata, I. M., Putra, I. P., Cahyani, N. K., & Samirana, P. O. (2020). Identifikasi senyawa volatil kulit ari biji kopi (*Coffea robusta*) guna optimalisasi kebermanfaatan. *Jurnal Farmasi Udayana*, 9(2), 100–109. <https://doi.org/10.24843/JFU.2020.v09.i02.p08>
- Panjaitan, T. F. C. (2023). Optimasi ekstraksi gelatin dari tulang ikan tuna (*Thunnus albacares*). *Wiyata*, 3(1). <https://doi.org/10.56710/wiyata.v3i1.65>
- Pavlidis, D. E., Mallouchos, A., Ercolini, D., Panagou, E. Z., & Nychas, G. J. E. (2019). A volatilomics approach for off-line discrimination of minced beef and pork meat and their admixture using HS-SPME GC/MS in tandem with multivariate data analysis. *Meat Science*, 151, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.01.003>
- Pranata, A. W., Yuliana, N. D., Amalia, L., & Darmawan, N. (2021). Volatilomics for halal and non-halal meatball authentication using solid-phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(5), 103146. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103146>
- Pratama, R. I., Rostini, I., & Lviawaty, E. (2018). Volatile components of raw Patin Catfish (*Pangasius hypophthalmus*) and Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 176(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/176/1/012040>
- Pratiwi, D. E., & Harjoko, A. (2023). Implementasi pengenalan wajah menggunakan PCA (Principal Component Analysis). *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation System*, 3(2), 175–184. <https://doi.org/10.22146/ijeis.3892>
- ReportLinker. (2022, May 10). *Global Gelatin Market to Reach 860.6 Thousand Metric Tons by the Year 2027* [Press release]. GlobeNewswire. Diakses dari <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/05/10/2439374/0/en/Global-Gelatin-Market-to-Reach-860-6-Thousand-Metric-Tons-by-the-Year-2027.html>
- Sae-leaw, T., & Benjakul, S. (2015). Physico-chemical properties and fishy odour of gelatin from seabass (*Lates calcarifer*) skin stored in ice. *Food Bioscience*, 10, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.01.001>
- Sipahelut, S. G. (2019). Perbandingan komponen aktif minyak atsiri dari daging buah pala kering cabinet dryer melalui metode distilasi air dan air-uap. *Agritekno: Jurnal Teknologi Pertanian*, 8(1), 8–13. <https://doi.org/10.30598/jagritekno.2019.8.1.8>
- Song, X., Canellas, E., & Nerin, C. (2021). Screening of volatile decay markers of minced pork by headspace-solid phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry and chemometrics. *Food Chemistry*, 342, 128341. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128341>
- Tukiran, N. A., Ismail, A., Mustafa, S., & Hamid, M. (2016). Determination of porcine gelatin in edible bird's nest by competitive indirect ELISA based on anti-peptide polyclonal antibody. *Food Control*, 59, 561–566. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.06.039>
- Usman, M., Sahar, A., Inam-Ur-Raheem, M., Rahman, U. ur, Sameen, A., & Aadil, R. M. (2022). Gelatin extraction from fish waste and potential applications in food sector. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(1), 154–163. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15286>
- Wang, Y., Wu, C., Jia, H., Mráz, J., Zhao, R., Li, S., Dong, X., & Pan, J. (2023). Modified structural and functional properties of fish gelatin by glycosylation with galacto-oligosaccharides. *Foods*, 12, 2828. <https://doi.org/10.3390/foods12152828>
- Watanabe, A., Kamada, G., Imanari, M., Shiba, N., Yonai, M., & Muramoto, T. (2015). Effect of aging on volatile compounds in cooked beef. *Meat Science*, 107, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.004>
- Worley, B., & Powers, R. (2016). PCA as a practical indicator of OPLS-DA model reliability. *Current Metabolomics*, 4(2), 97–103. <https://doi.org/10.2174/2213235X04666160613122429>
- Xu, J., Zhang, Y., Yan, F., Tang, Y., Yu, B., Chen, B., Lu, L., Yuan, L., Wu, Z., & Chen, H. (2023). Monitoring changes in the volatile compounds of tea made from summer tea leaves by GC-IMS and HS-SPME-GC-MS. *Foods*, 12(1), 146. <https://doi.org/10.3390/foods12010146>

- Yulia, M., Iriani, R., Suhandy, D., Waluyo, S., & Sugianti, C. (2017). Studi penggunaan UV-Vis spectroscopy dan kemometrika untuk mengidentifikasi pemalsuan kopi Arabika dan Robusta secara cepat. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 6(1). <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v6i1.%p>
- Zhang, Y., Ma, X., & Dai, Z. (2019). Comparison of nonvolatile and volatile compounds in raw, cooked, and canned yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(10), e14111. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14111>
- Zilhadia, Kusumaningrum, F., Betha, O. S., & Supandi. (2018). Diferensiasi gelatin sapi dan gelatin babi pada gummy vitamin C menggunakan metode kombinasi spektroskopi fourier transform infrared (FTIR) dan principal component analysis (PCA). *Pharmaceutical Sciences and Research*, 5(2), 90–96. <https://doi.org/10.7454/psr.v5i2.3709>
- Zhao, J., Wang, M., Xie, J., Zhao, M., Hou, L., Liang, J., Wang, S., & Cheng, J. (2017). Volatile flavor constituents in the pork broth of black-pig. *Food Chemistry*, 226, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.011>