

STUDI KEMOMETRIK SPEKTRUM INFRAMERAH BUAH CABAI JAWA (*Piper retrofractum* Vahl.) DARI BERBAGAI DAERAH DI INDONESIA

Melvia Sundalian*, Sri Gustini Husein, Tatik Rokayah

Sekolah Tinggi Farmasi Indonesia, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

*Email: melviasundalian@stfi.ac.id

Received: 04/06/2025, Revised: 14/08/2025, Accepted: 14/08/2025, Published: 31/08/2025

ABSTRAK

Cabai Jawa (*Piper retrofractum* Vahl.) merupakan tanaman herbal yang banyak dimanfaatkan dalam pengobatan tradisional untuk membantu mengatasi berbagai kondisi, seperti asma, gangguan pencernaan, kelelahan, dan infeksi. Aktivitas farmakologisnya berkaitan erat dengan kandungan metabolit sekunder, yang komposisinya dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, varietas, dan asal geografis. Perbedaan komposisi ini sulit diidentifikasi secara akurat menggunakan metode konvensional, sehingga diperlukan pendekatan kemometrik untuk memetakan variasi kimianya. Penelitian ini bertujuan menganalisis profil spektral buah Cabai Jawa dari berbagai daerah di Indonesia menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), serta mengidentifikasi kesamaan dan perbedaan karakteristik kimia antar sampel melalui *Principal Component Analysis* (PCA) dan analisis kluster. Sampel buah kering yang diperoleh dari Bandar Lampung, Bengkulu, Jember, Madura, Malang, Pamekasan, Pati, Sleman, Sumenep, dan Tanggamus dianalisis menggunakan FTIR tanpa proses ekstraksi, pada rentang bilangan gelombang 4000–500 cm⁻¹. Data spektrum kemudian diolah dengan PCA dan analisis kluster. Hasil skrining fitokimia dan analisis FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsi yang terkait dengan metabolit sekunder, seperti alkaloid, flavonoid, fenol, saponin, steroid, dan tanin. PCA menghasilkan varians kumulatif sebesar 99%, dengan pengelompokan Malang–Jember, Madura–Sumenep–Pamekasan, serta Bandar Lampung–Tanggamus, sementara perbedaan paling menonjol ditemukan pada Pati dan Sleman. Analisis kluster mengonfirmasi terbentuknya kelompok alami sesuai kesamaan spektral. Pendekatan kemometrik terbukti efektif dalam membedakan dan mengelompokkan profil kimia Cabai Jawa, serta berpotensi mendukung autentikasi geografis dan pengendalian mutu bahan baku herbal di Indonesia.

Kata kunci : Cabai Jawa, *Cluster Analysis*, Kemometrika, *Principal Component Analysis*.

ABSTRACT

Javanese long pepper (*Piper retrofractum* Vahl.) is a medicinal plant widely used in traditional medicine to help treat various conditions such as asthma, digestive disorders, fatigue, and infections. Its pharmacological activities are closely related to secondary metabolites, the composition of which can be influenced by environmental factors, cultivar, and geographical origin. These compositional differences are difficult to accurately identify using conventional methods; therefore, a chemometric approach is required to map the chemical variations. This study aimed to analyze the spectral profile of *P. retrofractum* fruits from various regions in

Indonesia using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy and to identify the similarities and differences in chemical characteristics among samples through Principal Component Analysis (PCA) and cluster analysis. Dried fruit samples collected from Bandar Lampung, Bengkulu, Jember, Madura, Malang, Pamekasan, Pati, Sleman, Sumenep, and Tanggamus were analyzed by FTIR without extraction, covering a wavenumber range of 4000–500 cm^{-1} . The obtained spectra were processed using PCA and cluster analysis. Phytochemical screening and FTIR analysis revealed the presence of functional groups associated with secondary metabolites such as alkaloids, flavonoids, phenols, saponins, steroids, and tannins. PCA yielded a cumulative variance of 99%, with sample grouping patterns of Malang–Jember, Madura–Sumenep–Pamekasan, and Bandar Lampung–Tanggamus, while the most distinct differences were observed in Pati and Sleman. Cluster analysis confirmed the formation of natural groups based on spectral similarity. The chemometric approach proved effective in differentiating and classifying the chemical profiles of *P. retrofractum*, with potential applications in geographical authentication and quality control of herbal raw materials in Indonesia.

Keywords: Javanese Pepper, Cluster Analysis, Chemometric, Principal Component Analysis

PENDAHULUAN

Piper retrofractum Vahl., biasa disebut sebagai cabai jawa atau cabai herbal, mewakili spesies botani yang menghasilkan bumbu kuliner yang signifikan (Silalahi, 2021; Hariani *et al.*, 2020). Entitas botani ini merupakan bagian integral untuk memenuhi tuntutan masyarakat akan rempah-rempah kuliner dan aplikasi terapi tradisional (Faramayuda *et al.*, 2021), selain keunggulannya dalam sektor makanan, minuman, herbal, dan farmasi (Jadid *et al.*, 2017). Produksi cabai jawa melampaui pemanfaatan domestik (Utami & Syauqi, 2023), mencakup kegiatan ekspor ke berbagai negara termasuk Singapura, Hong Kong, Malaysia, dan India (Boangmanalu & Zuhrotun, 2018).

Tanaman cabai Jawa atau cabai jamu, tersebar luas di wilayah tropis Indonesia dan secara khusus dibudidayakan secara intensif

di Pulau Madura, Jawa Timur (Nurhidayah *et al.*, 2024). Madura merupakan pusat produksi utama, dengan daerah seperti Sumenep, Pamekasan, Sampang, dan Bangkalan menjadi sentra budidaya (Nurhidayah *et al.*, 2024). Di Provinsi Lampung, cabai jawa juga menunjukkan kadar piperin tertinggi dibanding daerah lain, mempertegas potensinya sebagai daerah produksi unggulan (Hikmawanti *et al.*, 2021). Selain itu, Kabupaten Sumenep, Madura, tercatat memiliki area budidaya seluas 1.709 ha, diikuti oleh Sampang (1.017 ha), Pamekasan (715 ha), Bangkalan (356 ha), Lamongan (276 ha), dan Lampung (630 ha), yang menjadikan wilayah ini sebagai tulang punggung pasokan nasional (Vardani & Arinie, 2019). Produksi dari wilayah-wilayah ini mendukung kebutuhan domestik sekaligus permintaan ekspor komoditas cabai

jawa ke berbagai negara (Utami & Syauqi, 2023).

Buah *Piper retrofractum* Vahl. atau cabai Jawa telah lama digunakan dalam pengobatan tradisional Asia Tenggara. Senyawa aktif utama seperti piperin, piperonalin, dan *guineensine* diyakini bertanggung jawab atas berbagai efek farmakologisnya, termasuk sebagai afrodisiak, stimulan, karminatif, dan tonik (Faramayuda *et al.*, 2021). Secara empiris, buah ini digunakan untuk mengatasi gangguan pencernaan, demam, perut kembung, muntah, dan lemah syahwat, serta membantu dalam perawatan pascanatal (Silalahi, 2021; Evizal, 2020). Aktivitas antimikroba, antipiretik, antiinflamasi, dan imunostimulan dari piperin juga telah dibuktikan melalui uji laboratorium terhadap berbagai bakteri patogen seperti *Staphylococcus aureus* dan *E. coli* (Panphut *et al.*, 2020). Oleh karena itu, cabai jawa secara rutin digunakan dalam formulasi obat tradisional dan memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai fitofarmaka.

Pengujian bahan alam berbasis instrumen telah menjadi pendekatan penting dalam analisis dan karakterisasi senyawa aktif, salah satunya menggunakan spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Pendekatan ini dapat digunakan

untuk berbagai keperluan seperti otentikasi bahan, deteksi pemalsuan produk, serta penjaminan mutu berdasarkan lokasi budidaya dan metode pengolahan (Umar *et al.*, 2022). Teknik ini dinilai efisien dalam waktu dan biaya, karena sampel dapat dianalisis langsung dalam bentuk bubuk tanpa proses preparasi yang rumit (Lourenço *et al.*, 2015). Spektroskopi FTIR dipilih karena keunggulannya dalam hal kemudahan penggunaan, kecepatan, dan efektivitas biaya (Ji *et al.*, 2025). Pola spektral yang dihasilkan bersifat kompleks dan menggambarkan karakteristik kimia yang menyeluruh dari suatu zat, sehingga memerlukan penerapan strategi kemometrik seperti analisis multivariat (PCA, PLS-DA) untuk meningkatkan interpretasi tanpa mengorbankan akurasi (Liu *et al.*, 2020).

Penerapan sinergis antara spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan teknik kemometrik telah menunjukkan efektivitas tinggi dalam berbagai aplikasi, seperti klasifikasi asal geografis tanaman obat (Zeghoud *et al.*, 2021), deteksi pemalsuan dalam produk herbal (Fatmarahmi *et al.*, 2022), serta prediksi kapasitas antioksidan total dalam produk minuman seperti anggur dan madu (Topala & Tătaru, 2019). Teknik ini juga telah digunakan untuk membedakan spesies

tumbuhan herbal yang serupa, seperti kunyit, temulawak, bangle, dan jahe merah (Nurani *et al.*, 2021), menunjukkan keandalan kombinasi FTIR dan kemometrik dalam otentikasi dan kontrol kualitas bahan alam.

Meskipun metode FTIR yang dikombinasikan dengan PCA telah banyak digunakan pada komoditas herbal lain, hingga saat ini belum ditemukan laporan yang secara khusus melakukan klasifikasi geografis cabai jawa dari berbagai daerah di Indonesia menggunakan pendekatan ini. Penelitian-penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada karakterisasi fitokimia, kandungan piperin, atau uji bioaktivitasnya, tanpa mengeksplorasi variasi profil spektrum berdasarkan lokasi budidaya. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan dalam mengintegrasikan analisis FTIR dengan PCA dan analisis kluster untuk membedakan profil kimia cabai jawa dari sepuluh wilayah geografis di Indonesia. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan metode otentikasi, penjaminan mutu, dan pelacakan asal bahan baku dalam rantai pasok cabai Jawa.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Untuk penelitian ini, alat yang digunakan meliputi spektrofotometer FTIR (Thermo Scientific Nicolet iS5 FT-IR Spectrometer), *Holder* ZnSe iD3 ATR (*Attenuated Total Reflectance*), komputer, timbangan, oven pengering, cawan, saringan mesh 100, desikator, blender, hotplate, mortir dan stemper, kertas saring, dan peralatan gelas lainnya.

Bahan yang digunakan adalah buah cabe Jawa (*Piper retrofractum* Vahl.) dari beberapa daerah di Indonesia, etanol *pro analysis*, ammonia *pro analysis*, kloroform *pro analysis*, asam klorida, pereaksi Dragendorff dan Mayer, air suling, serbuk magnesium, alkohol amil, FeCl₃, eter, pereaksi Liebermann-Burchard, dan kalium hidroksida.

Jalannya Penelitian

1. Penyiapan bahan baku dan pemilihan buah cabai jawa

Dalam rangka memperoleh spesimen buah cabai Jawa dari berbagai daerah di Indonesia, sampel dikumpulkan dari Bandar Lampung, Bengkulu, Jember, Madura, Malang, Pamekasan, Pati, Sleman, Sumenep, dan Tanggamus. Pengambilan dilakukan pada periode panen April–Mei 2021 dengan metode *purposive sampling* berdasarkan kriteria kematangan buah optimal dan kondisi tanaman sehat. Setiap sampel

diambil dari minimal lima tanaman berbeda untuk mewakili variasi di lokasi tersebut. Setelah panen, buah dibersihkan dari kotoran, kemudian dikeringkan kadar air berkurang secara signifikan. Selanjutnya, buah dikemas dalam kantong kertas berlabel dan disimpan pada suhu ruang ($\pm 25-27^\circ\text{C}$). Identifikasi tanaman penghasil buah cabai Jawa (*Piper retrofractum* Vahl) kemudian dilakukan di Laboratorium Taksonomi Tumbuhan, Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran.

2. Persiapan sampel uji

Simplisia buah cabai Jawa mengalami proses pencampuran sampai terbentuk bubuk halus, yang kemudian diayak melalui jaring dengan ukuran partikel 100 mikrometer.

3. Skrining fitokimia

Skrining fitokimia dilakukan, meliputi deteksi alkaloid, flavonoid, tanin, fenolat, triterpenoid, steroid, kuinon, dan saponin.

4. Penentuan kadar air

Peralatan keseimbangan kelembaban diaktifkan, dan tampilan numerik diinisialisasi. Sampel 500 mg bubuk cabai Jawa kemudian dimasukkan ke dalam wadah aluminium. Perangkat keseimbangan kelembaban kemudian disegel, dan pengamatan dilakukan sampai pembacaan yang stabil diperoleh. Nilai yang tercatat

pada instrumen keseimbangan kelembaban ditafsirkan dan didokumentasikan sebagai kadar air.

5. Penentuan profil spektrum FTIR buah cabai jawa

Pengukuran *Fourier Transform Infrared* (FT-IR) dijalankan dalam rentang panjang gelombang $4000-500\text{ cm}^{-1}$, menggunakan resolusi 8 cm^{-1} selama 32 pemindaian. Sampel diposisikan pada permukaan duduk FT-IR ZnSe *Attenuated Total Reflectance* (ATR) dan dikompresi menggunakan cetakan (penekan). Prosedur pengukuran ini direplikasi sepuluh kali untuk setiap spesimen.

6. Analisis profil spektrum FTIR menggunakan chemometrics di the unscrambler x

Data spektral FTIR yang diperoleh dari komputer spektrometer disimpan dalam format bawaan perangkat, kemudian diekspor ke format Excel untuk memudahkan pengolahan data. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak *The Unscrambler X*. Sebelum analisis statistik multivariat, data spektral mengalami proses transposisi dan *preprocessing*.

Tahapan *preprocessing* dipilih untuk meminimalkan *noise*, mengoreksi pergeseran baseline, serta meningkatkan resolusi puncak

yang relevan. Langkah-langkah yang diterapkan meliputi:

- a. **Smoothing** : untuk mengurangi *random noise* tanpa menghilangkan informasi penting.
- b. **Normalization** : untuk mengatasi perbedaan intensitas akibat variasi konsentrasi atau ketebalan sampel.
- c. **Derivative** : untuk memperjelas puncak yang tumpang tindih.
- d. **Baseline correction** : untuk mengeliminasi pergeseran baseline akibat variasi instrumen.
- e. **Standard Normal Variate (SNV)** untuk mengurangi efek hamburan cahaya (*light scattering*) pada sampel serbuk yang tidak homogen sempurna.

Analisis *Principal Component Analysis* (PCA) digunakan untuk mengidentifikasi pola variasi utama pada data spektral. Hanya komponen dengan *eigenvalue* > 1 yang dipertahankan, dan validasi internal dilakukan menggunakan metode *Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV)* untuk memastikan kestabilan model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengumpulan dan penentuan tanaman buah cabai jawa

Spesimen botani *Piper retrofractum* Valh., yang buahnya banyak dimanfaatkan dalam sektor pengobatan tradisional, diperoleh dari sepuluh daerah geografis yang berbeda di Indonesia, yaitu Bandar Lampung, Bengkulu, Jember, Madura, Malang, Pamekasan, Pati, Sleman, Sumenep, dan Tanggamus. Proses identifikasi tumbuhan dilakukan di Herbarium Jatinangor yang berada di Laboratorium Taksonomi Tumbuhan Departemen Biologi FMIPA Universitas Padjajaran. Prosedur ini bertujuan untuk mengkonfirmasi identitas taksonomi buah cabai Jawa dan mengurangi potensi kesalahan identifikasi selama pengumpulan bahan baku. Hasil analisis menunjukkan bahwa spesimen yang diselidiki sesuai dengan buah cabai Jawa (*Piper retrofractum* Valh.) milik keluarga Piperaceae. Langkah prosedural seperti itu sangat penting untuk menegaskan ketepatan identifikasi bahan yang digunakan dalam upaya penelitian.

2. Persiapan sampel

Sampel buah cabai Jawa diproses menjadi bubuk partikulat halus dan kemudian disaring melalui saringan 100 mesh. Pendekatan metodologis ini berusaha untuk mengurangi dimensi sampel sambil secara bersamaan meningkatkan luas permukaan keseluruhannya. Beberapa

penyelidikan sebelumnya, termasuk yang dilakukan oleh Purwakusumah *et al.* (2014), Khoirudin *et al.* (2015), dan Sulistyani dan Nuril (2017), telah menggunakan ukuran partikel yang sesuai dengan mesh 100 untuk analisis spektroskopi FTIR. Penggunaan ukuran partikel yang dikurangi dimaksudkan untuk mengoptimalkan penyerapan energi dari radiasi inframerah oleh gugus fungsi dan ikatan molekul yang ada dalam sampel, sehingga menghasilkan intensitas yang tinggi dalam profil spektrum FTIR.

3. Skrining fitokimia bubuk buah cabai jawa

Hasil skrining fitokimia (Tabel 1) menunjukkan bahwa seluruh sampel cabai Jawa dari sepuluh daerah di Indonesia konsisten mengandung alkaloid, flavonoid, fenolat, tanin, triterpenoid/steroid, dan saponin, sementara kuinon tidak terdeteksi. Pola ini sejalan dengan temuan Nurhidayah *et al.* (2024), yang melaporkan dominasi senyawa alkaloid dan flavonoid pada spesies

yang sama. Meskipun skrining ini memberikan gambaran umum komposisi metabolit sekunder, metode kualitatif ini belum mampu membedakan sampel berdasarkan daerah asalnya.

4. Pengujian kadar Air Bubuk Buah Cabai Jawa

Kadar air bubuk cabai Jawa yang diperoleh dari sepuluh daerah di Indonesia berkisar antara 1,17% hingga 3,27%. Evaluasi dilakukan menggunakan moisture analyzer pada suhu 105°C hingga berat sampel stabil. Kandungan air tertinggi ditemukan pada sampel asal Sleman (3,27%), sedangkan yang terendah berasal dari Jember (1,17%). Pengukuran ini penting karena kadar air dapat memengaruhi spektrum inframerah yang dihasilkan, khususnya dalam kaitannya dengan penyerapan oleh gugus O-H. Kadar air yang rendah membantu meminimalkan gangguan pada hasil spektrum FTIR.

Tabel 1. Skrining fitokimia buah cabai Jawa

No.	Nama Daerah	Hasil						
		Alkaloid	Flavonoid	Tanin	Fenolat	Triterpenoid & steroid	Saponin	Kuinon
1	Bandar Lampung	+	+	+	+	+	+	-
2	Bengkulu	+	+	+	+	+	+	-
3	Jember	+	+	+	+	+	+	-
4	Madura	+	+	+	+	+	+	-
5	Malang	+	+	+	+	+	+	-
6	Pamekasan	+	+	+	+	+	+	-
7	Pati	+	+	+	+	+	+	-

No.	Nama Daerah	Alkaloid	Flavonoid	Tanin	Hasil			
					Fenolat	Triterpenoid & steroid	Saponin	Kuinon
8	Sleman	+	+	+	+	+	+	-
9	Sumenep	+	+	+	+	+	+	-
10	Tanggamus	+	+	+	+	+	+	-

Tabel 2. Pengujian kadar air

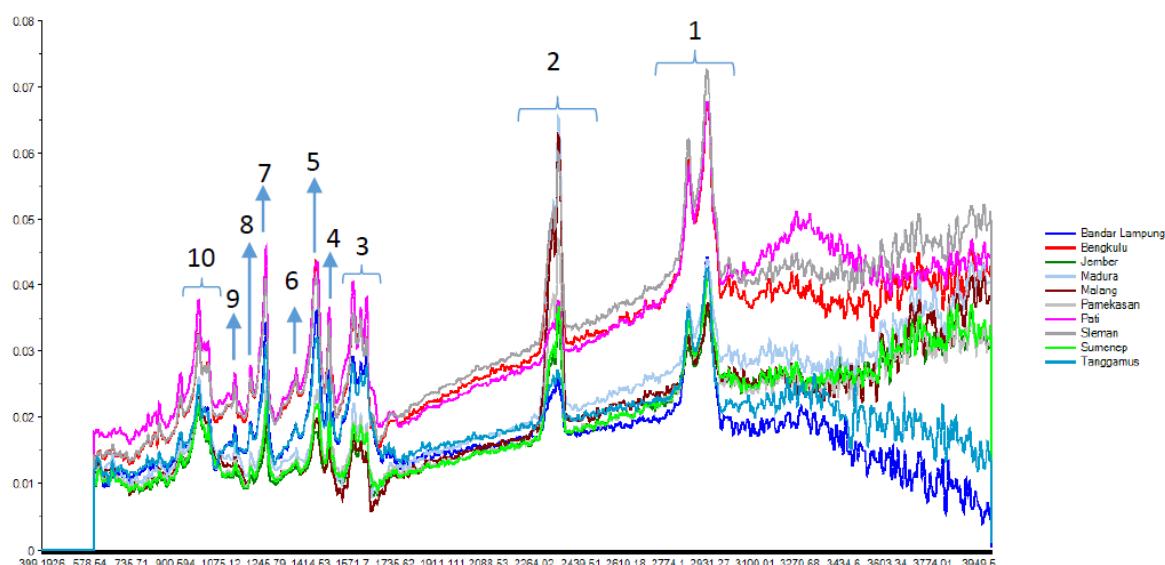
No.	Nama Daerah	Kadar Air (%)
1	Bandar Lampung	1,64
2	Bengkulu	3,11
3	Jember	1,17
4	Madura	2,80
5	Malang	2,87
6	Pamekasan	1,94
7	Pati	2,68
8	Sleman	3,27
9	Sumenep	3,16
10	Tanggamus	2,04

terkandung. Sepuluh pita penyerapan terdeteksi dengan intensitas sedang hingga kuat (Gambar 1 dan Tabel 3).

5. Penentuan profil spektrum FTIR (Fourier Transform Infrared) buah cabai jawa

Analisis dilakukan menggunakan spektrofotometer FTIR-ATR untuk memperoleh profil spektrum senyawa kimia dalam bubuk buah cabai Jawa. Sebelum pengukuran sampel, spektrum latar belakang direkam untuk menghilangkan gangguan dari gas seperti karbon dioksida dan uap air.

Hasil spektrum menunjukkan pola pita penyerapan yang serupa pada seluruh sampel dalam rentang bilangan gelombang 4000–500 cm^{-1} . Namun, intensitas penyerapan bervariasi antar sampel, mengindikasikan perbedaan konsentrasi senyawa kimia yang



Gambar 1. Profil spektrum FTIR sepuluh sampel buah cabai Jawa

Tabel 3. Data profil spektrum inframerah buah cabai Jawa

No.	Bilangan gelombang (cm^{-1})		Kemungkinan gugus fungsi
	Sampel	Pustaka	
1	2925-2851	3000-2800	Uluran C-H hidrokarbon alifatik
2	2359-2369	2360-2331	Uluran C=N
3	1584-1580	1650-1550	Tekukan N-H amina
4	1490-1488	1510-1450	Tekukan C=C-C cincin aromatic
5	1445-14383	1375-1450	Tekukan $-\text{CH}_3$ alifatik
6	1366-1363	1350-1260	Tekukan O-H hidroksi
7	1250-1252	1310-1250	Uluran C-O ester
8	1193-1191	1225-950	C-H cincin aromatik
9	1133-1132	1190-1130	Uluran C-N amina
10	996-995	1000-60	Tekukan $=\text{C-H}$ hidrokarbon alifatik

Analisis FTIR (Tabel 3) dan data serapan maksimum (Tabel 4) memungkinkan interpretasi yang lebih spesifik. Keberadaan alkaloid dan flavonoid berpotensi berkontribusi terhadap intensitas serapan pada bilangan gelombang $1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ (regangan C=C aromatik) dan $1200\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ (regangan C–O fenolik). Puncak pada $2925\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ (regangan C–H alifatik)

dapat dikaitkan dengan kandungan triterpenoid/steroid. Karena perbedaan intensitas tidak dapat dianalisis secara akurat melalui observasi visual saja, analisis lanjutan dilakukan menggunakan pendekatan statistik kemometrik untuk mengevaluasi perbedaan antar sampel secara objektif dan kuantitatif.

6. Analisis profil spektrum menggunakan kemometrik

Spektrum FTIR yang dihasilkan dianalisis lebih lanjut menggunakan teknik kemometrik *Principal Component Analysis* (PCA) dan analisis kluster. Tujuan analisis ini adalah untuk mengelompokkan sampel berdasarkan perbedaan intensitas puncak serapan, serta mengidentifikasi pola

keterkaitan antar sampel dari berbagai daerah.

Sebelum dilakukan analisis, data spektrum diproses terlebih dahulu melalui beberapa tahapan pra-pemrosesan, seperti penghalusan, normalisasi, derivatif, koreksi garis dasar, dan Standard Normal Variate (SNV) (Tabel 5). Langkah ini bertujuan untuk mengurangi gangguan yang tidak relevan dan meningkatkan akurasi analisis.

Tabel 4. Serapan maksimum absorban FTIR pada buah cabai Jawa

No.	Sampel	Serapan Maksimum Pada Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)										
		2925-2921	2852-2851	2359-2369	1584-1580	1490-1488	1445-1438	1366-1363	1249-1252	1193-1191	1133-1132	996-995
1	Bandar Lampung	0,0440	0,0370	0,0240	0,0291	0,0272	0,0362	0,0190	0,0343	0,0193	0,0184	0,0250
2	Bengkulu	0,0673	0,0580	0,0599	0,0353	0,0345	0,0435	0,0256	0,0424	0,0255	0,0243	0,0325
3	Jember	0,0358	0,0306	0,0348	0,0157	0,0159	0,0176	0,0126	0,0176	0,0110	0,0188	0,0210
4	Madura	0,0438	0,0370	0,0651	0,0221	0,0203	0,0288	0,0153	0,0260	0,0144	0,0156	0,0260
5	Malang	0,0373	0,0323	0,0625	0,0173	0,0158	0,0198	0,0134	0,0208	0,0126	0,0138	0,0231
6	Pamekasan	0,0419	0,0327	0,0469	0,0193	0,0205	0,0236	0,0139	0,0242	0,0127	0,0135	0,0226
7	Pati	0,0677	0,0580	0,0376	0,0399	0,0367	0,0436	0,0273	0,0460	0,0278	0,0265	0,0377
8	Sleman	0,0724	0,0622	0,0597	0,0357	0,0342	0,0409	0,0259	0,0408	0,0258	0,0243	0,0324
9	Sumenep	0,0410	0,0344	0,0367	0,0186	0,0194	0,0218	0,0134	0,0224	0,0122	0,0129	0,0220
10	Tanggamas	0,0423	0,0362	0,0270	0,0279	0,0258	0,0321	0,0189	0,0309	0,0188	0,0174	0,0247

Tabel 5. *Preprocessing* data sebelum dilakukan analisis data

Percobaan	<i>Smoothing</i>	<i>Normalize</i>	<i>Derivative</i>	<i>Baseline</i>	<i>SNV</i>	Hasil PCA
1	+	-	-	-	-	99%
2	-	+	-	-	-	92%
3	-	-	+	-	-	92%
4	-	-	-	+	-	95%
5	-	-	-	-	+	97%
6	+	+	+	+	+	93%

Hasil dari PCA dan kluster menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar sampel memiliki kemiripan profil, terdapat variasi signifikan yang cukup untuk memisahkan sampel berdasarkan asal geografisnya. Pendekatan ini membantu

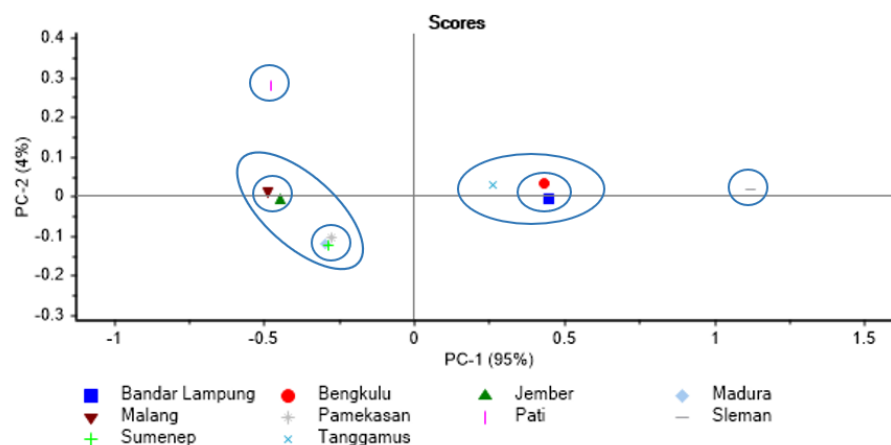
memperjelas struktur data dan memberikan informasi penting terkait perbedaan kimia yang mungkin tidak terlihat melalui pengamatan visual spektrum saja.

Analisis spektrum menunjukkan bahwa sampel buah cabai Jawa dari berbagai

daerah memiliki pola serapan yang serupa, meskipun terdapat perbedaan dalam kekuatan serapannya. Perbedaan intensitas ini mencerminkan variasi kadar senyawa kimia antar sampel. Dalam rentang bilangan gelombang 4000–500 cm^{-1} , teridentifikasi sepuluh pita serapan dengan intensitas sedang hingga kuat, yang menunjukkan keberadaan gugus fungsi utama dalam senyawa metabolit buah cabai Jawa (Tabel 3 dan 4).

Analisis PCA terhadap seluruh rentang bilangan gelombang menunjukkan bahwa dua komponen utama mampu menjelaskan 99% variasi data, yang mencerminkan kualitas spektral yang sangat baik. Hasil ini

menunjukkan adanya pengelompokan berdasarkan asal geografis. Sampel dari Malang-Jember, Madura-Sumenep-Pamekasan, serta Bandar Lampung-Tanggamus membentuk kelompok yang berdekatan, mengindikasikan kemiripan profil kimia. Sementara itu, sampel dari Pati dan Sleman terletak terpisah dari kelompok lain, menandakan perbedaan komposisi kimia yang lebih mencolok (Gambar 2). Jarak antar sampel dalam ruang PCA mencerminkan tingkat kesamaan kimia, di mana kedekatan menunjukkan kemiripan, dan jarak yang jauh mencerminkan perbedaan yang lebih besar.



Gambar 2. *Plot scores PCA buah cabai Jawa dari sepuluh daerah di Indonesia*

Hasil analisis *Principal Component Analysis* (PCA) menunjukkan bahwa komponen utama pertama (PC1) memiliki nilai eigen tertinggi sebesar **0,2918**, diikuti oleh komponen kedua (PC2) sebesar **0,0135**.

Kedua komponen ini secara kumulatif menjelaskan **99%** dari total variasi dalam data, dengan kontribusi masing-masing 95% untuk PC1 dan 4% untuk PC2 (Tabel 6). Hal ini menunjukkan tingkat keseragaman yang

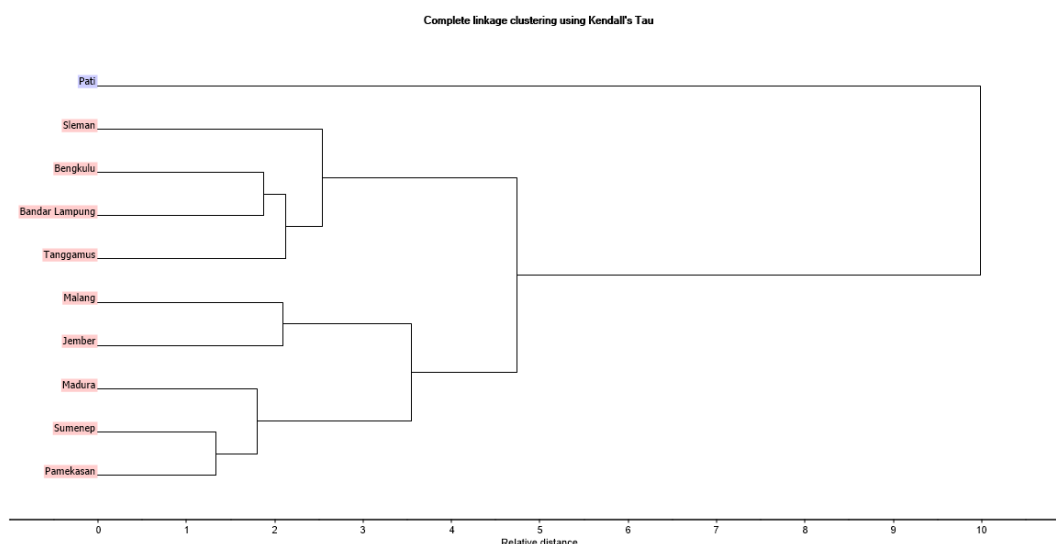
tinggi antar sampel serta mengindikasikan bahwa mayoritas informasi dalam data dapat direpresentasikan secara efektif dalam dua dimensi. Oleh karena itu, PC1 dan PC2 digunakan sebagai dasar utama visualisasi distribusi kimia antar sampel.

Tabel 6. Nilai *eigenvalue* dan proporsi *plot scores*

Variabel	<i>Eigenvalue</i>	Proporsi (%)
PC-1	0,2918	95
PC-2	0,0135	4
PC-3	0,0012	0
PC-4	0,0006	0
PC-5	0,0005	0
PC-6	0,0002	0
PC-7	0,0002	0

Meskipun PCA mampu mengidentifikasi pola pengelompokan,

pendekatan ini tidak selalu cukup untuk membedakan setiap sampel secara jelas. Untuk memperkuat interpretasi, analisis dilanjutkan dengan konstruksi dendrogram berdasarkan hasil analisis kluster. Dendrogram tersebut menunjukkan tingkat kedekatan antar sampel cabai Jawa, di mana panjang garis penghubung mencerminkan tingkat perbedaan kimiawi. Semakin jauh jarak antar sampel dalam dendrogram, semakin besar perbedaan karakteristik yang dimilikinya, sehingga membantu menggambarkan variasi genetik atau kimia antar sepuluh varietas yang dianalisis (Lourenço *et al.*, 2015; Zeghoud *et al.*, 2021; Umar *et al.*, 2022).



Gambar 3. Dendrogram analisis kluster

Dendrogram pada Gambar 3 menggambarkan tingkat kedekatan antar

sampel cabai Jawa, di mana panjang garis penghubung mencerminkan jarak Euclidean

(dalam *feature distance*). Semakin kecil nilai jarak, semakin besar kemiripan komposisi kimia antar sampel. Misalnya, Pamekasan dan Sumenep memiliki jarak terdekat menandakan kesamaan profil kimia yang tinggi.

Analisis kluster dilakukan menggunakan metode keterkaitan lengkap (*complete linkage*), yang cenderung menghasilkan kluster kompak dengan jarak maksimum antar anggota kluster yang minimal. Berdasarkan hasil, terbentuk tiga kelompok utama:

- a. Kluster 1: Pamekasan – Sumenep
- b. Kluster 2: Malang – Jember
- c. Kluster 3: Bandar Lampung – Bengkulu

Validasi konsistensi hasil dilakukan dengan membandingkan pola pengelompokan dari dendrogram dan PCA. Hasil PCA memperlihatkan distribusi sampel pada bidang PC1 dan PC2 yang konsisten dengan kluster dalam dendrogram, di mana sampel-sampel dengan jarak kluster terdekat juga berdekatan pada ruang PCA. Konsistensi ini menunjukkan bahwa variasi kimia yang terdeteksi oleh PCA sejalan dengan hasil analisis kluster, sehingga meningkatkan keandalan interpretasi.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa analisis spektrum FTIR berhasil mengidentifikasi gugus fungsi khas dalam buah cabai Jawa dari berbagai daerah. Metode kemometrik PCA dan analisis kluster mampu mengelompokkan sampel berdasarkan karakteristik kimianya secara jelas. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi awal bagi upaya karakterisasi kimia spasial cabai Jawa, yang pada tahap selanjutnya berpotensi mendukung sistem sertifikasi mutu berbasis asal geografis serta peningkatan kontrol kualitas herbal di industri fitofarmaka.

DAFTAR PUSTAKA

- Boangmanalu, R. K., & Zuhrotun, A. (2018). Potensi khasiat obat tanaman marga *Piper*: *Piper nigrum* L., *Piper retrofractum* Vahl., *Piper betle* Linn., *Piper cubeba* L., dan *Piper crocatum* Ruiz & Pav. *Jurnal Farmaka*, 16(3).
- Evizal, R. (2020). Status fitofarmaka dan perkembangan agroteknologi cabe jawa (*Piper retrofractum* Vahl.). *Jurnal Agroteknologi*, 18(1).
- Faramayuda, F., Arifin, S. Z., Syam, A. K., & Elfahmi, E. (2021). Cabe Jawa (*Piper retrofractum* Vahl.): Penggunaan tradisional, fitokimia dan

- aktivitas farmakologi. *Perspektif*, 20(1), 26.
- Hariani, S. A., Zubaidah, S., & Corebima, A. D. (2020). Analyzing Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) of the bioactive compound of Javanese long pepper (*Piper retrofractum* Vahl.) essential oils. *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*, 11(4), 7270–7276.
<https://doi.org/10.26452/ijrps.v11i4.3803>
- Haryati, N. A., Saleh, C., & Erwin. (2015). Uji toksisitas dan aktivitas antibakteri ekstrak daun merah tanaman pucuk merah (*Syzygium myrtifolium* Walp.) terhadap bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli*. *Jurnal Kimia Mulawarman*, 13, 35–40.
- Hikmawanti, N. P. E., Hanani, E., Maharani, S., & Putri, A. I. W. (2021). Piperine levels in Java chili and black fruits extracts from regions with different altitude. *Jurnal Jamu Indonesia*, 6(1), 21–27.
<https://doi.org/10.29244/jji.v6i1.176>
- Jadid, N., Hidayati, D., Hartanti, S. R., Arraniry, B. A., Rachman, R., & Wikanta, W. (2017). Antioxidant activities of different solvent extracts of *Piper retrofractum* Vahl. using DPPH assay. *AIP Conference Proceedings*, 1854, 020019.
<https://doi.org/10.1063/1.4985410>
- Ji, Z., Liu, H., Li, J., & Wang, Y.-Y. (2025). ATR-FTIR as a green tool for rapid identity authentication of *Gastrodia elata* Blume under the influence of multi-biological variability. *Vibrational Spectroscopy*, 122, 103766.
<https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2024.103766>
- Kartini, K., Khotimah, K., Jayani, N., & Setiawan, F. (2024). Identification of *Orthosiphon stamineus* from different phytogeographical zones in Indonesia by FTIR-fingerprinting and chemometrics. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 12(2), 76–84.
<https://doi.org/10.7324/jabb.2024.168638>
- Khoirudin, M., Yelmida, & Zultiniar. (2015). Sintesis dan karakterisasi hidroksiapatit (HAp) dari kulit kerang darah (*Anadara granosa*) dengan proses hidrotermal. *JOM FTEKNIK*, 2(2), 1–6.
- Liu, L., Zuo, Z.-T., Wang, Y.-Z., & Xu, F.-R. (2020). A fast multi-source

- information fusion strategy based on FTIR spectroscopy for geographical authentication of wild *Gentiana rigescens*. *Microchemical Journal*, 158, 105360. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105360>
- Lourenço, A. V. F., Moreira, A., Bruginski, E., Zuccolotto, T., Heiden, G., & Campos, F. R. (2015). Rapid method for the classification of *Baccharis* species by Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy and chemometrics analysis. *Analytical Methods*, 7(4), 1464–1470. <https://doi.org/10.1039/C4AY02757A>
- Mu'afa, S. F., & Ulinuha, N. (2019). Perbandingan metode single linkage, complete linkage dan average linkage dalam pengelompokan kecamatan berdasarkan variabel jenis ternak Kabupaten Sidoarjo. *INFORM*, 4(2), 112–120.
- Nurhidayah, E., Hidayati, D., Habiba, R. A., & Maulidya, S. (2024). Proximate, phytochemical analysis and phenol content of Javanese long pepper (*Piper retrofractum* Vahl) from several regions in Madura. *JITIPARI (Jurnal Ilmiah Teknologi dan Industri Pangan UNISRI)*, 9(1), 16–22. <https://doi.org/10.33061/jitipari.v9i1.10225>
- Panphut, W., Budsabun, T., & Sangsuriya, P. (2020). *In vitro* antimicrobial activity of *Piper retrofractum* fruit extracts against microbial pathogens causing infections in human and animals. *International Journal of Microbiology*, 2020, 5638961. <https://doi.org/10.1155/2020/5638961>
- Pratidina, N. V. A., Syamsunihar, A., & Winarso, S. (2015). Pertumbuhan bibit cabe jawa (*Piper retrofractum* Vahl.) sebagai respon terhadap dosis dan jenis pupuk nitrogen. *Berkala Ilmu Pertanian*, 10(10), 1–5.
- Purwakusumah, E. D., Rafi, M., Syafitri, U. D., Nurcholis, W., & Adzkiya, M. A. Z. (2014). Identifikasi dan autentikasi jahe merah menggunakan kombinasi spektroskopi FTIR dan kemometrik. *Agritech*, 34(1), 83–85.
- Rohaeti, E., Rafi, M., Syafitri, U. D., & Heryanto, R. (2015). Fourier transform infrared spectroscopy combined with chemometrics for discrimination of *Curcuma longa*, *Curcuma xanthorrhiza*, and *Zingiber cassumunar*. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 137, 1244–1249.

- <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.09.103>
- Silalahi, M. (2021). Utilization and bioactivity of Java long pepper (*Piper retrofractum* Vahl) for education purposes. In *Proceedings of the 2nd Annual Conference on Blended Learning, Educational Technology and Innovation (ACBLETI 2020)*, 556–560. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210615.052>
- Sulistiyani, M., & Huda, N. (2017). Optimasi pengukuran spektrum vibrasi sampel protein menggunakan spektrofotometer Fourier transform infrared (FT-IR). *Indonesian Journal of Chemical Science*, 6(2), 174–175.
- Umar, A., Syahrini, R., Ranteta'dung, I., & Rafi, M. (2022). FTIR-based fingerprinting combined with chemometrics method for rapid discrimination of *Jatropha* spp. from different regions in South Sulawesi. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 13(1), 90–96. <https://doi.org/10.7324/japs.2023.130113>
- Utami, I., & Syauqi, M. (2023). Design of a digital logistics system for cabya (*Piper retrofractum* Vahl) commodities to optimize export needs. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 22(1), 11–19. <https://doi.org/10.23917/jiti.v22i1.21663>
- Vardani, A., & Arinie, F. (2019). Design and development of monitoring system for jamu chili plants against the mechanism of the growing environment on the web. *Jurnal Jartel: Jurnal Jaringan Telekomunikasi*, 9(2), 87–92. <https://doi.org/10.33795/jartel.v9i2.209>
- Yuliantini, A., Wanda, R. A., Fauzan, Z. M., & Aiyi, A. (2020). Deteksi tespong (*Oenanthe javanica*) pada bahan baku daun Ashitaba (*Angelica keiskei*) menggunakan metode FTIR yang dikombinasikan dengan PCA. *Indonesia Natural Research Pharmaceutical Journal*, 5(2), 114–123.
- Zeghoud, S., Hemmami, H., Rebiai, A., & Ben Seghir, B. (2021). Using FTIR spectroscopy and chemometrics for classifying of Algerian medicinal plant species. *Vegetos*, 35, 298–305.