



Autentikasi Minyak Goreng secara Non-Destruktif melalui *Laser Speckle Imaging* Portabel dengan *Linear Discriminant Analysis*

Santika Anggraini Bakri, Neneng Fitrya, Hendra Pratama, Shabri Putra Wirman

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Jl. Tuanku Tambusai, Delima, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru 28292

* Corresponding author. E-mail: nenengfitrya@umri.ac.id

ABSTRAK

Autentikasi minyak goreng menjadi permasalahan penting karena praktik pencampuran minyak berkualitas rendah dan minyak oplosan dapat menurunkan kualitas pangan serta membahayakan kesehatan konsumen. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem autentikasi minyak goreng secara non-destruktif berbasis *Laser Speckle Imaging* (LSI) portabel yang terintegrasi dengan *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Sistem dirancang menggunakan laser dioda 650 nm, kamera CMOS A4Tech PK-710G 16 MP, Raspberry Pi 4B, dan Arduino Uno untuk akuisisi serta pengolahan citra spekel secara real-time. Parameter citra berupa standar deviasi, intensitas rata-rata, dan kontras spekel diekstraksi menggunakan MATLAB 2019b, kemudian diklasifikasikan menggunakan metode LDA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memisahkan tiga kategori minyak, yaitu minyak kemasan, minyak curah, dan minyak oplosan secara jelas pada proyeksi LD1 dan LD2. Nilai LD1 minyak kemasan berada pada rentang +2 hingga +8, minyak curah berada pada rentang -1 hingga +2, sedangkan minyak oplosan berada pada rentang -6 hingga -2. Validasi ekstraksi fitur menggunakan MATLAB dan ImageJ menunjukkan rata-rata galat relatif sebesar 0,0586%, yang menandakan tingkat kesesuaian sangat tinggi. Hasil *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) juga menunjukkan korelasi yang konsisten dengan kontras spekel, di mana minyak kemasan memiliki transmitansi tinggi dan kontras stabil, sedangkan minyak oplosan memiliki absorbansi tinggi dan kontras rendah. Berdasarkan hasil tersebut, sistem LSI portabel berbasis LDA terbukti efektif, cepat, dan non-destruktif untuk autentikasi minyak goreng serta berpotensi diterapkan pada pemantauan mutu pangan.

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diserahkan

2 April 2026

Revisi pertama

21 Mei 2026

Diterima

2 Juni 2026

Tersedia secara online

19 Juni 2026

Tanggal Publikasi

19 Juni 2026

Kata Kunci:

Kontras Spekel; *Laser Speckle Imaging*; *Linear Discriminant Analysis*; Minyak Goreng.

ABSTRACT

Authentication of cooking oil has become an important issue due to the adulteration practice of mixing low-quality oils, which can reduce food quality and pose health risks to consumers. This study aimed to develop a portable non-destructive cooking oil authentication system based on Laser Speckle Imaging (LSI) integrated with Linear Discriminant Analysis (LDA). The system was designed using a 650 nm diode laser, an AqTech PK-710G 16 MP CMOS camera, a Raspberry Pi 4B, and an Arduino Uno for real-time speckle image acquisition and processing. Image parameters including standard deviation, mean intensity, and speckle contrast were extracted using MATLAB 2019b and subsequently classified using the LDA method. The results showed that the system successfully separated three categories of cooking oil, namely packaged oil, bulk oil, and adulterated oil, through clear LD1 and LD2 projections. The LD1 values of packaged oil were distributed within the range of +2 to +8, bulk oil ranged from -1 to +2, while adulterated oil ranged from -6 to -2. Feature extraction validation between MATLAB and ImageJ demonstrated a very small average relative error of 0.0586%, indicating high consistency between both software platforms. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) also showed a strong correlation with speckle contrast, where packaged oil exhibited high transmittance and stable contrast, while adulterated oil showed high absorbance and low contrast. These findings demonstrate that the portable LSI system combined with LDA is effective, rapid, and non-destructive for cooking oil authentication and has strong potential for food quality monitoring applications.

ARTICLE INFO**Article History:****Submitted**

April 2, 2026

First Revised

May 21, 2026

Accepted

June 2, 2026

First Available online

June 19, 2026

Publication Date

June 19, 2026

Keyword:

Cooking Oil; Laser Speckle Imaging; Linear Discriminant Analysis; Speckle Contrast.

PENDAHULUAN

Minyak goreng merupakan salah satu komoditas pangan yang paling banyak dikonsumsi di seluruh dunia serta menjadi bahan utama dalam aktivitas kuliner sehari-hari [1]. Keaslian dan kualitas minyak goreng seringkali terganggu akibat praktik kecurangan seperti pencampuran dengan minyak berkualitas rendah atau minyak jelantah [2]. Praktik pemalsuan tersebut tidak hanya menurunkan nilai gizi, tetapi juga menimbulkan risiko kesehatan serta

kerugian ekonomi bagi konsumen dan industri [3].

Metode analisis konvensional seperti *Fourier Transform Infrared* (FTIR) spectroscopy, spektroskopi UV-Vis, dan kromatografi telah banyak digunakan untuk menilai komposisi maupun keaslian minyak goreng [4]. Teknik-teknik tersebut terbukti akurat, namun memerlukan instrumen berbiaya tinggi, operator terampil, serta kondisi laboratorium yang terkendali sehingga bersifat tidak portabel

dan sulit dipindahkan untuk penggunaan di luar laboratorium. Kondisi tersebut membuat metode ini kurang sesuai untuk aplikasi *real-time* maupun inspeksi di lapangan. Sebagian metode bahkan bersifat destruktif karena membutuhkan kontak langsung atau modifikasi sampel, sehingga tidak praktis digunakan dalam pemantauan kualitas secara rutin.

Teknik optik muncul sebagai alternatif yang menjanjikan karena bersifat non-destruktif, non-invasif, cepat, dan mudah digunakan [5, 6]. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah *Laser Speckle Imaging* (LSI), dengan prinsip kerja berdasarkan pantulan cahaya baur akibat paparan laser pada permukaan sampel [7, 8]. LSI telah digunakan secara luas di bidang medis dan material science, serta diaplikasikan dalam inspeksi non-destruktif pada produk pertanian maupun deteksi aktivitas fisiologis pada buah segar [9].

Penelitian terdahulu menggunakan LSI sebagai identifikasi karakterisasi buah kelapa sawit [10], memantau aliran darah [11], mikrosirkulasi luka [12], dan pemetaan aliran darah [13]. Penelitian ini mengembangkan sistem detektor cerdas portabel berbasis *Laser Speckle Imaging* (LSI) untuk autentikasi minyak goreng secara non-destruktif [14, 15]. Sistem

dirancang dengan mengintegrasikan laser dioda 650 nm sebagai sumber cahaya koheren yang stabil, kamera CMOS dengan sensitivitas tinggi untuk merekam pola spekel, serta *Raspberry Pi* sebagai prosesor yang efisien dalam akuisisi dan pengolahan citra secara *real-time*.

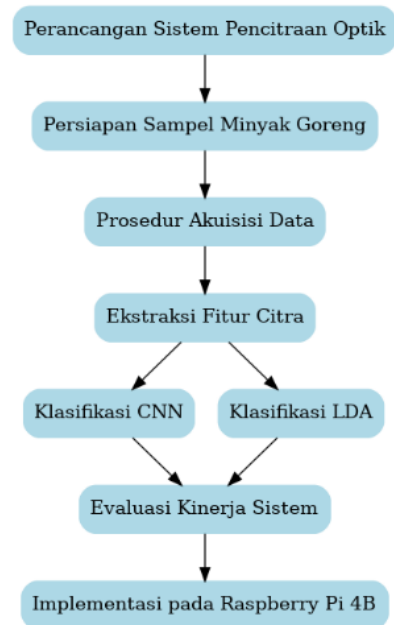
Parameter spekel yang diekstraksi meliputi kontras, intensitas, dan standar deviasi, kemudian dimanfaatkan sebagai fitur masukan untuk klasifikasi menggunakan *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Algoritma ini mampu membedakan kategori dengan akurasi tinggi melalui pemaksimalan jarak antar kelas. Metode yang diterapkan menghasilkan autentikasi yang cepat, akurat, dan non-destruktif dalam membedakan minyak kemasan, minyak curah, dan minyak oplosan. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi sensor optik portabel berbasis kecerdasan buatan sebagai solusi praktis untuk menjamin keaslian dan keamanan pangan.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi sistem autentikasi minyak goreng non-destruktif berbasis *Laser Speckle Imaging* (LSI) portabel yang terintegrasi dengan *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Parameter

spekel berupa kontras, intensitas, dan standar deviasi digunakan sebagai fitur optik untuk membedakan kategori minyak. Algoritma LDA dimanfaatkan untuk menghasilkan klasifikasi minyak kemasan, minyak curah, dan minyak oplosan dengan akurasi tinggi. Validitas sistem diperkuat melalui perbandingan hasil LSI dengan spektrum FTIR. Penelitian ini diharapkan menghasilkan teknologi sensor portabel yang efektif dan praktis untuk deteksi kecurangan minyak goreng dalam pemantauan mutu pangan.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian dirancang secara terstruktur sehingga setiap tahapan pelaksanaan berjalan terarah dan menghasilkan keluaran yang sesuai dengan tujuan penelitian. Kegiatan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fisika, Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau. Seluruh proses dilakukan secara bertahap dan berkesinambungan guna memperoleh sistem klasifikasi yang dapat diuji serta dievaluasi secara komprehensif. Untuk memperjelas alur penelitian, diagram alir metodologi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Perangkat Keras dan Desain Sistem

Penelitian ini menggunakan seperangkat instrumen pencitraan optik berbasis *Laser Speckle Imaging*. Komponen utama terdiri atas laser dioda merah 650 nm sebagai sumber cahaya koheren, kamera CMOS A4Tech PK-710G 16 MP untuk merekam pola *speckle*, serta kuvet kaca sebagai wadah sampel. Posisi relatif antara laser, sampel, dan kamera dikendalikan menggunakan motor stepper NEMA 17HS3401 yang terhubung dengan driver Easydriver A3967. Mekanisme translasi linier menggunakan *leadscrew* T8, *as shaft stainless steel* 8 mm, *linear rail* poros 8 mm, bearing KPo8, dan flexible coupling sehingga sistem mampu mengatur jarak pencahayaan dengan presisi tinggi. Raspberry Pi 4B berfungsi

sebagai prosesor portabel, sedangkan Arduino Uno digunakan untuk mengendalikan motor stepper.

Bahan penelitian terdiri atas sampel minyak goreng yang dikelompokkan ke dalam tiga kategori. Kategori pertama adalah minyak kemasan dengan kode A, yaitu A1 dan A2. Kategori kedua adalah minyak curah dengan kode B, terdiri atas tiga sampel berbeda (B1–B3). Kategori ketiga adalah minyak oplosan dengan kode C, yang mencakup sembilan variasi (C1–C9) hasil pencampuran minyak A2 dengan minyak curah dalam proporsi tertentu.

Rancangan sistem pencitraan optik memanfaatkan sinar laser 650 nm yang diarahkan ke sampel minyak goreng dalam kuvet. Interaksi cahaya dengan partikel minyak menghasilkan pola *speckle* yang direkam oleh kamera CMOS. Posisi laser, sampel, dan kamera diatur menggunakan mekanisme translasi linier yang digerakkan motor stepper, sehingga jarak pencahayaan dapat dikendalikan secara stabil dan citra *speckle* yang diperoleh konsisten. Desain mekanik sistem ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan skematik rangkaian elektronik ditampilkan pada Gambar 3.

Pengoperasian perangkat keras dikendalikan menggunakan Arduino IDE

yang mengatur pergerakan motor stepper melalui mikrokontroler Arduino Uno. Proses akuisisi citra dilakukan dengan MATLAB 2019b, yang juga digunakan untuk mengekstraksi parameter *speckle* berupa standar deviasi, intensitas rata-rata, dan nilai kontras. Data citra kemudian diproses lebih lanjut untuk pengembangan model *Convolutional Neural Network* (CNN). Pembuatan dan pelatihan model CNN dilakukan menggunakan *Visual Studio Code* dengan *framework TensorFlow*. Model terlatih diekspor ke format *TensorFlow Lite* dan ditanamkan ke *Raspberry Pi 4B* agar sistem mampu melakukan klasifikasi minyak goreng secara *real-time*.

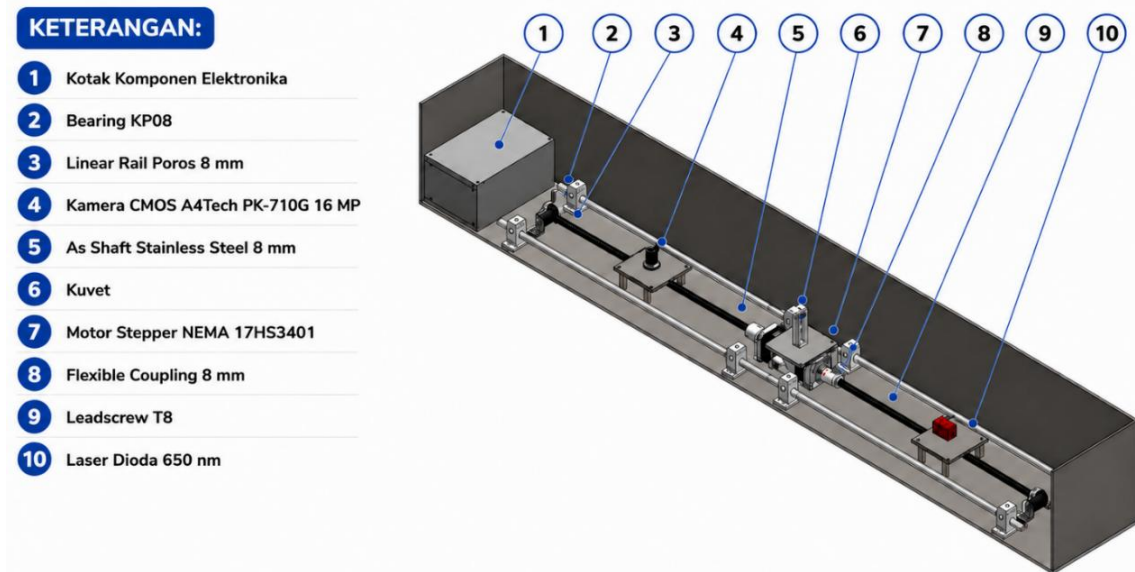
Prosedur Akuisisi Data

Proses akuisisi data dilakukan setelah sistem pencitraan optik dirakit dan disesuaikan dengan konfigurasi yang telah ditentukan. Sampel minyak goreng dari setiap kategori ditempatkan dalam kuvet kaca yang diposisikan pada jalur optik antara laser dioda merah 650 nm dan kamera CMOS A4Tech PK-710G 16 MP. Sinar laser diarahkan menuju sampel sehingga menghasilkan pola *speckle* akibat hamburan cahaya yang terjadi di dalam medium minyak. Pola *speckle* tersebut kemudian direkam secara *real-time* oleh

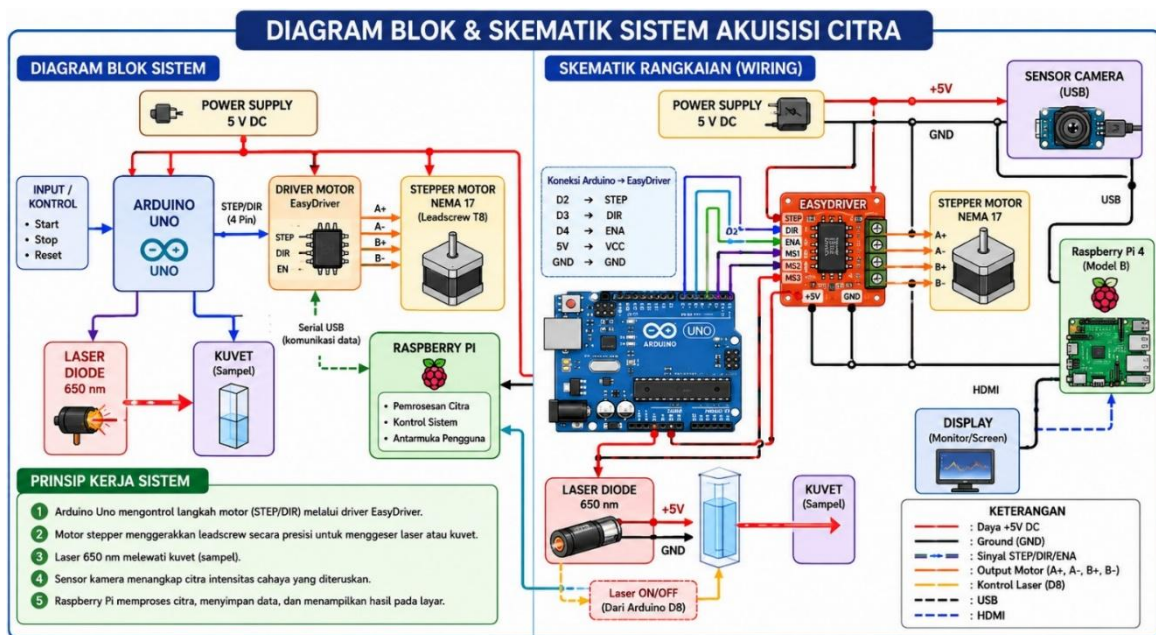
kamera CMOS dengan resolusi citra 640×480 piksel.

Pengaturan posisi relatif antara laser, sampel, dan kamera dikendalikan oleh motor stepper NEMA 17HS3401 melalui mekanisme translasi linier. Kendali motor stepper dilakukan menggunakan

Arduino Uno yang diprogram melalui Arduino IDE, sedangkan *Raspberry Pi 4B* berperan sebagai pengolah data utama. Sistem translasi ini memungkinkan variasi jarak pencahayaan diatur dengan presisi sehingga citra *speckle* yang dihasilkan stabil dan konsisten.



Gambar 2. Desain Sistem *Laser Speckle Imaging*



Gambar 3. Skematik Rangkaian Sistem

Akuisisi citra *speckle* dijalankan melalui GUI MATLAB 2019b, yang sekaligus menyimpan data dalam format digital untuk setiap sampel minyak. Dari setiap sampel, pengambilan citra *speckle* dilakukan pada 10 titik pengukuran dengan 3 kali perulangan untuk masing-masing dari 4 sisi kuvet. Setiap perulangan menghasilkan 10 *frame* citra berformat (.jpg), sehingga diperoleh total 1.200 *frame* per sampel. Jumlah sampel yang digunakan sebanyak 14 jenis, sehingga dari setiap variasi jarak pencahayaan terkumpul total 16.800 *frame* citra *speckle*. Seluruh data ini diproses sebagai dataset yang digunakan pada tahap pelatihan dan pengujian sistem klasifik.

Parameter optik berupa kontras *speckle*, intensitas rata-rata, dan standar deviasi diekstraksi langsung dari citra yang terekam. Data numerik hasil ekstraksi disimpan dalam bentuk matriks sehingga siap digunakan untuk analisis statistik dengan *Linear Discriminant Analysis* (LDA).

Ekstraksi Fitur Citra

Tahap ekstraksi fitur citra dilakukan untuk memperoleh parameter numerik yang dapat menggambarkan karakteristik pola *speckle* dari setiap sampel minyak goreng. Proses ini menghasilkan tiga parameter utama yaitu standar deviasi

intensitas (σ), intensitas rata-rata ($\bar{I}$), dan kontras *speckle* (K).

Standar deviasi intensitas dihitung untuk mengetahui tingkat penyebaran nilai piksel terhadap rata-rata. Besarnya nilai standar deviasi menunjukkan tingkat fluktuasi cahaya pada pola *speckle*. Standar deviasi dihitung menggunakan persamaan (1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2} \quad (1)$$

I_i menyatakan nilai intensitas piksel ke- i , $\bar{I}$ merupakan intensitas rata-rata, dan N jumlah total piksel dalam citra [16]. Intensitas rata-rata dihitung dengan menjumlahkan seluruh nilai piksel kemudian dibagi dengan jumlah total piksel. Parameter ini merepresentasikan tingkat kecerahan keseluruhan citra *speckle* dan dihitung menggunakan persamaan (2):

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \quad (2)$$

Kontras *speckle* dihitung dari rasio standar deviasi terhadap nilai intensitas rata-rata [17]. Nilai kontras menunjukkan derajat ketidakteraturan distribusi cahaya yang terbentuk akibat hamburan koheren dalam medium minyak goreng. Nilai

kontras dihitung menggunakan persamaan (3):

$$K = \frac{\sigma}{\bar{I}} \quad (3)$$

Seluruh proses ekstraksi fitur dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB 2019b. Setiap citra *speckle* berformat (.jpg) dibaca secara otomatis, kemudian dihitung parameter standar deviasi, intensitas rata-rata, dan kontras. Data hasil ekstraksi disimpan dalam bentuk matriks numerik dan digunakan sebagai masukan pada tahap analisis dengan metode *Linear Discriminant Analysis* (LDA).

Klasifikasi *Linear Discriminant Analysis* (LDA)

Metode *Linear Discriminant Analysis* (LDA) diterapkan untuk mengklasifikasikan minyak goreng berdasarkan parameter citra *speckle* berupa standar deviasi (σ), intensitas rata-rata ($\bar{I}$), dan kontras (K). Setiap sampel minyak memiliki nilai yang berbeda dari ketiga parameter tersebut sehingga dapat digunakan sebagai ciri pembeda. Proses analisis dilakukan menggunakan Google Colab dengan bahasa pemrograman Python dan pustaka *scikit-learn* karena mendukung komputasi berbasis awan dan mampu menangani data dalam jumlah besar.

Tahap awal melibatkan penyusunan data fitur dari seluruh sampel minyak goreng. Rata-rata keseluruhan (μ) dan rata-rata tiap kelas (μ_c) dihitung sebagai acuan distribusi data. Variasi data dalam satu kelas dihitung melalui matriks *within-class scatter* (S_W) yang dihitung menggunakan persamaan (4):

$$S_W = \sum_{c=1}^c \sum_{x_i \in c} (x_i - \mu_c)(x_i - \mu_c)^T \quad (4)$$

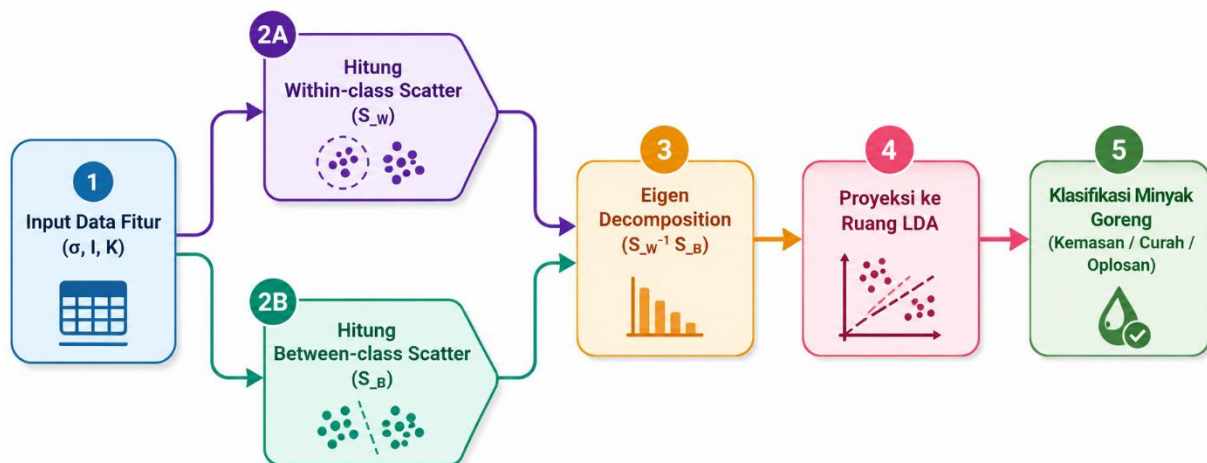
Perbedaan rata-rata antar kelas dihitung dengan matriks *between-class scatter* (S_B) menggunakan persamaan (5):

$$S_B = \sum_{c=1}^c N_c(\mu_c - \mu)(\mu_c - \mu)^T \quad (5)$$

Ruang proyeksi terbaik ditentukan dengan menyelesaikan persamaan (6):

$$S_W^{-1} S_B w = \lambda w \quad (6)$$

Vektor eigen (w) yang dihasilkan digunakan sebagai sumbu baru untuk memproyeksikan data fitur. Proses proyeksi ini membuat distribusi antar kategori minyak menjadi lebih terpisah sehingga pola dari minyak kemasan, minyak curah, dan minyak oplosan dapat terlihat dengan jelas. Model klasifikasi dibangun dari hasil proyeksi dan digunakan untuk menentukan kelas dari data uji. Diagram alur proses LDA dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alur Proses Linear Discriminant Analysis (LDA).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan Parameter Citra MATLAB dengan *ImageJ*

Pola citra *speckle* pada Tabel 1 menunjukkan variasi pola sebaran intensitas cahaya dari sampel minyak goreng. Pola *speckle* pada minyak kemasan cenderung lebih homogen dengan distribusi butiran terang dan gelap yang relatif merata. Minyak curah memperlihatkan pola *speckle* yang lebih kasar dengan tingkat kontras sedikit lebih tinggi akibat variasi partikel yang tidak seragam. Minyak oplosan menghasilkan pola *speckle* yang bervariasi tergantung komposisinya. Perbedaan pola *speckle* inilah yang menjadi dasar pengukuran parameter kontras, intensitas, dan standar deviasi.

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai kontras hasil pengolahan citra

menggunakan MATLAB dan *ImageJ* memperlihatkan perbedaan yang sangat kecil. Selisih absolut berada pada rentang 0,000014 hingga 0,000386 dengan galat relatif antara 0,006% hingga 0,101%. Rata-rata galat relatif tercatat 0,0586%, menandakan tingkat kesesuaian tinggi antara kedua *software*. Data rinci ditunjukkan pada Tabel 2 Perbandingan Nilai Citra MATLAB dengan *ImageJ*.

Pola perbedaan nilai kontras terlihat konsisten pada setiap kategori sampel. Minyak kemasan (A1 dan A2) menunjukkan nilai kontras MATLAB sedikit lebih tinggi dibanding *ImageJ*, misalnya pada sampel A1 yang mencatat kontras 0,388832 (MATLAB) dan 0,388446 (*ImageJ*), dengan selisih sekitar 0,000386 atau 0,10%. Minyak curah dan oplosan cenderung menunjukkan nilai kontras *ImageJ* sedikit lebih tinggi, seperti pada sampel B2 yang

mencatat kontras 0,229019 (MATLAB) dan 0,229033 (*ImageJ*), dengan selisih hanya 0,000014 atau 0,006%. Hasil ini menunjukkan bahwa kedua *software* menghasilkan nilai yang hampir identik dan konsisten untuk kebutuhan analisis.

Selisih nilai kontras berasal dari detail perhitungan internal yang berbeda, seperti representasi bilangan desimal, mekanisme pembulatan, konversi citra ke format keabuan, serta pemilihan ROI. Rumus kontras yang digunakan tetap sama pada kedua perangkat lunak, yaitu perbandingan antara simpangan baku dengan intensitas rata-rata, sehingga hasil akhir berada pada skala yang sebanding. Selisih di bawah 0,11% tidak berpengaruh terhadap hasil klasifikasi.

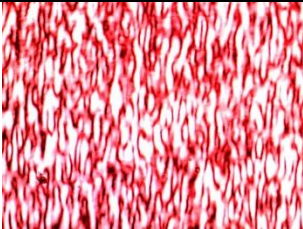
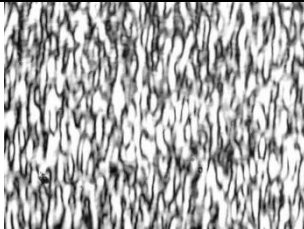
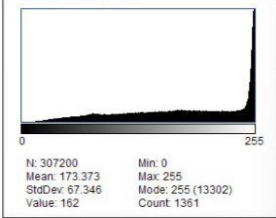
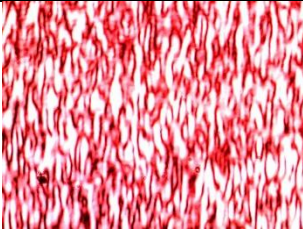
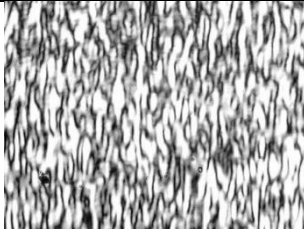
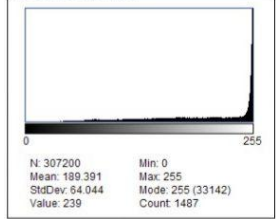
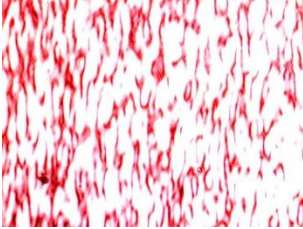
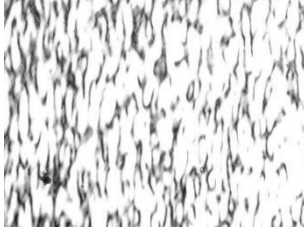
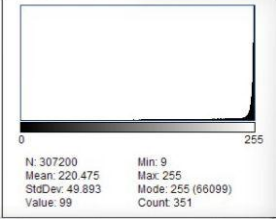
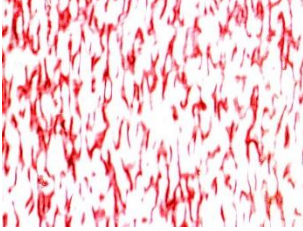
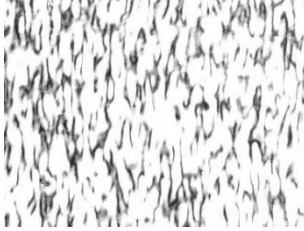
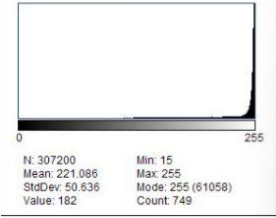
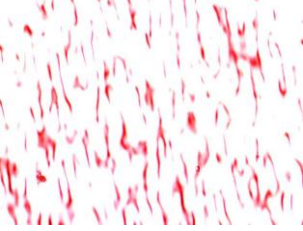
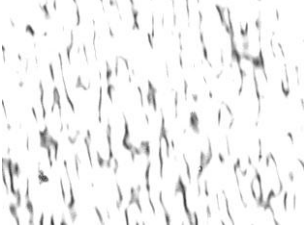
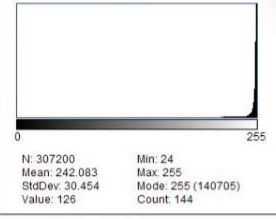
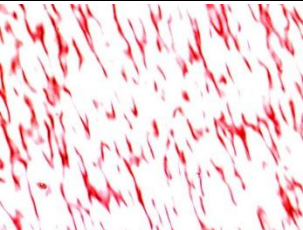
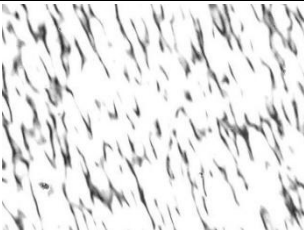
Konsistensi nilai kontras yang dihasilkan MATLAB dan *ImageJ* memperkuat reliabilitas tahap ekstraksi fitur dalam penelitian ini. Validasi silang tersebut memberikan justifikasi yang kuat untuk menjadikan hasil MATLAB sebagai data utama pada tahapan klasifikasi minyak goreng.

Klasifikasi Menggunakan *Linear Discriminant Analysis*

Analisis klasifikasi menggunakan *Linear Discriminant Analysis* (LDA) dilakukan untuk memisahkan tiga kategori minyak goreng, yaitu kemasan, curah, dan oplosan, berdasarkan parameter citra *speckle* yang telah diekstraksi. LDA memproyeksikan data berdimensi tinggi ke dalam ruang diskriminan berdimensi rendah sehingga distribusi tiap kelas dapat divisualisasikan dengan lebih jelas [18]. Proses ini menghasilkan nilai *Linear Discriminant* (LD) yang menjadi sumbu pemisah antar kelas. Hasil klasifikasi divisualisasikan dalam dua bentuk grafik, yaitu proyeksi satu dimensi (LD1) yang dapat dilihat pada Gambar 5 dan proyeksi dua dimensi (LD1–LD2) yang dapat dilihat pada Gambar 6.

Grafik proyeksi satu dimensi pada Gambar 5 memperlihatkan distribusi nilai LD1 untuk masing-masing kategori minyak. Titik minyak kemasan (merah) terkonsentrasi pada rentang koordinat sekitar +2 hingga +8. Sebaran yang rapat menandakan konsistensi dan homogenitas yang tinggi.

Tabel 1. Pola Citra Speckle

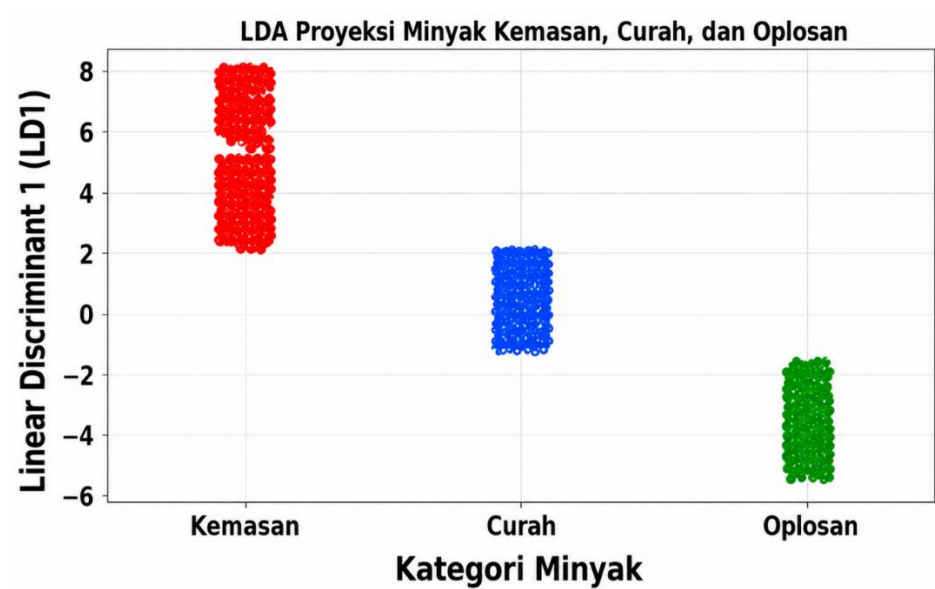
Sampel	RGB	Greyscale	Histogram
A1			 N: 307200 Min: 0 Mean: 173.373 Max: 255 StdDev: 67.346 Mode: 255 (13302) Value: 162 Count: 1361
A2			 N: 307200 Min: 0 Mean: 180.391 Max: 255 StdDev: 64.044 Mode: 255 (33142) Value: 239 Count: 1487
B1			 N: 307200 Min: 9 Mean: 220.475 Max: 255 StdDev: 49.893 Mode: 255 (66099) Value: 99 Count: 351
B2			 N: 307200 Min: 15 Mean: 221.086 Max: 255 StdDev: 50.636 Mode: 255 (61058) Value: 182 Count: 749
C1			 N: 307200 Min: 24 Mean: 242.083 Max: 255 StdDev: 30.454 Mode: 255 (140705) Value: 126 Count: 144
C2			 N: 307200 Min: 23 Mean: 232.652 Max: 255 StdDev: 42.534 Mode: 255 (111586) Value: 120 Count: 264

Tabel 2. Perbandingan Nilai Citra MATLAB dengan *ImageJ*

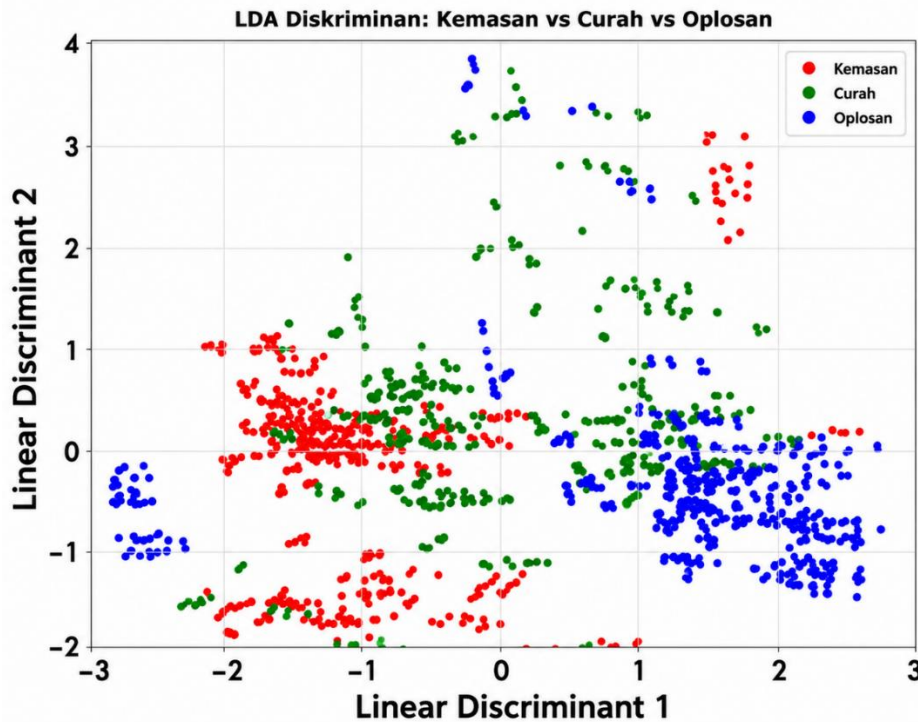
Sampel	Matlab			ImageJ			%Error
	Standar Deviasi	Intensitas	Kontras	Standar Deviasi	Intensitas	Kontras	
A1	67,341	173,188	0,388832	67,346	173,373	0,388446	0,099289
A2	64,086	189,367	0,338422	64,044	189,391	0,338158	0,078201
B1	49,789	220,137	0,226173	49,893	220,475	0,226298	0,055256
B2	50,634	221,091	0,229019	50,636	221,086	0,229033	0,006212
C1	30,454	242,111	0,125785	30,454	242,083	0,125800	0,011566
C2	42,498	232,690	0,182638	42,534	232,652	0,182822	0,101057

Titik minyak curah (biru) terkumpul pada koordinat -1 hingga +2 dengan distribusi lebih melebar. Pola ini menunjukkan variasi internal yang lebih besar dibanding minyak kemasan. Titik minyak oplosan (hijau) terkonsentrasi pada koordinat -6 hingga -2, yang terletak jelas di sisi negatif LD1.

Posisi ini menandakan perbedaan signifikan dengan dua kategori lainnya. Pemisahan yang tidak saling tumpang tindih memperlihatkan bahwa LD1 menjadi parameter utama dalam membedakan kelas minyak [19].



Gambar 5. Proyeksi LDA Satu Dimensi



Gambar 6. Proyeksi LDA Dua Dimensi

Gambar 6 menampilkan sebaran dua dimensi (LD1–LD2). Grafik proyeksi dua dimensi memperlihatkan distribusi data berdasarkan kombinasi LD1 (sumbu horizontal) dan LD2 (sumbu vertikal). Titik minyak kemasan (merah) dominan berada pada LD1 negatif hingga mendekati nol dengan LD2 berkisar antara -2 sampai +2. Titik minyak curah (hijau) terletak di sekitar koordinat LD1 mendekati nol hingga positif kecil dengan LD2 antara -1 sampai +3. Titik minyak oplosan (biru) menempati area LD1 positif (0 hingga +3) dengan LD2 antara -2 sampai +2. Perbedaan koordinat memperlihatkan bahwa LD1 masih berfungsi sebagai pembeda utama antar

kelas, sedangkan LD2 memperjelas batas antara minyak curah dan oplosan.

Distribusi yang terbentuk pada kedua grafik memperlihatkan pola klasifikasi yang konsisten. Nilai LD1 positif tinggi (2–8) mengindikasikan karakteristik minyak kemasan dengan kontras lebih stabil. Nilai LD1 mendekati nol (-1 sampai +2) mencerminkan variasi minyak curah. Nilai LD1 negatif (-6 sampai -2) menunjukkan ciri khas minyak oplosan dengan kualitas berbeda signifikan. Interpretasi ini menegaskan kemampuan LDA dalam memisahkan kategori minyak dengan jelas berdasarkan parameter *speckle* [20].

Korelasi Kontras Spekel dengan Metode Fourier Transform Infrared

Pengujian *Fourier Transform Infrared* (FTIR) menghasilkan spektrum transmitansi dan absorbansi dari sampel minyak goreng A1–C9 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Spektrum transmitansi memperlihatkan seberapa besar cahaya dapat melewati sampel, sedangkan spektrum absorbansi menunjukkan seberapa besar energi cahaya diserap oleh molekul dalam minyak. Grafik transmitansi ditampilkan dalam bentuk kurva dengan sumbu horizontal berupa bilangan gelombang dan sumbu vertikal berupa nilai transmitansi. Nilai transmitansi yang tinggi menandakan lebih banyak cahaya yang melewati sampel. Grafik absorbansi menampilkan pola kebalikan, di mana nilai absorbansi tinggi berarti lebih banyak cahaya terserap oleh struktur kimia minyak.

Sampel minyak goreng kemasan (A) menampilkan kurva transmitansi tinggi dengan puncak absorbansi rendah dibanding minyak curah (B) dan oplosan (C). Minyak curah memperlihatkan kurva transmitansi sedang dengan nilai absorbansi lebih besar daripada minyak kemasan. Minyak oplosan menunjukkan transmitansi terendah dengan absorbansi

paling tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa minyak A memiliki kualitas paling baik, sedangkan minyak oplosan memiliki penyerapan cahaya lebih besar yang mengindikasikan adanya degradasi atau pencampuran bahan [21].

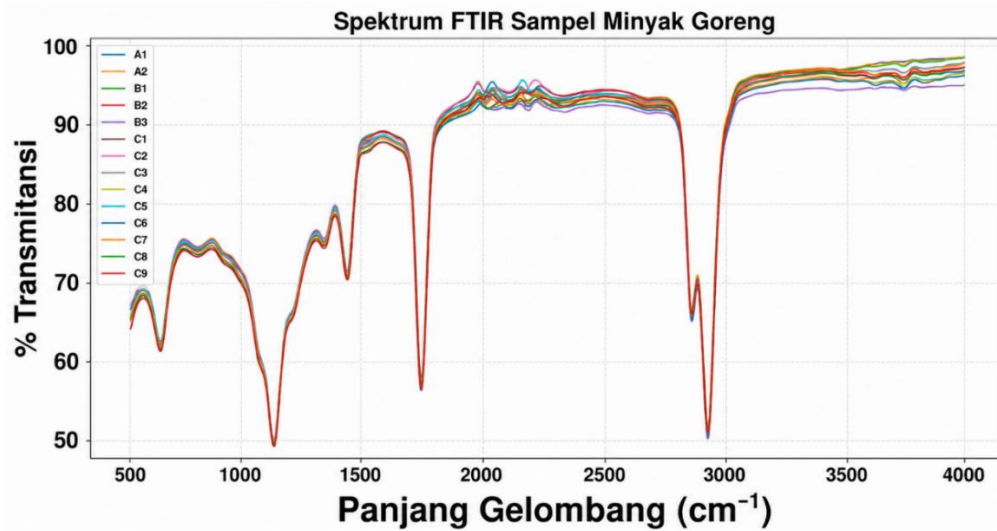
Spektrum FTIR minyak goreng memperlihatkan pola khas pada bilangan gelombang tertentu yang berkaitan dengan gugus fungsi utama. Grafik transmitansi menunjukkan puncak penurunan signifikan pada daerah 1743 cm^{-1} yang merepresentasikan ikatan karbonil (C=O) ester, serta pada sekitar 2920 cm^{-1} yang berkaitan dengan peregangan C-H alifatik [22]. Puncak lain pada daerah 1160 cm^{-1} mencerminkan vibrasi C-O . Pola transmitansi yang lebih tinggi menandakan bahwa cahaya lebih banyak melewati sampel, sedangkan nilai transmitansi yang rendah menandakan penyerapan yang lebih besar oleh molekul minyak [23].

Grafik absorbansi memperlihatkan puncak dominan pada bilangan gelombang yang sama, dengan serapan tertinggi pada sekitar 2920 cm^{-1} dan 1743 cm^{-1} . Nilai absorbansi yang besar menunjukkan adanya intensitas serapan cahaya oleh gugus fungsi, yang pada minyak oplosan terlihat lebih tinggi dibanding minyak

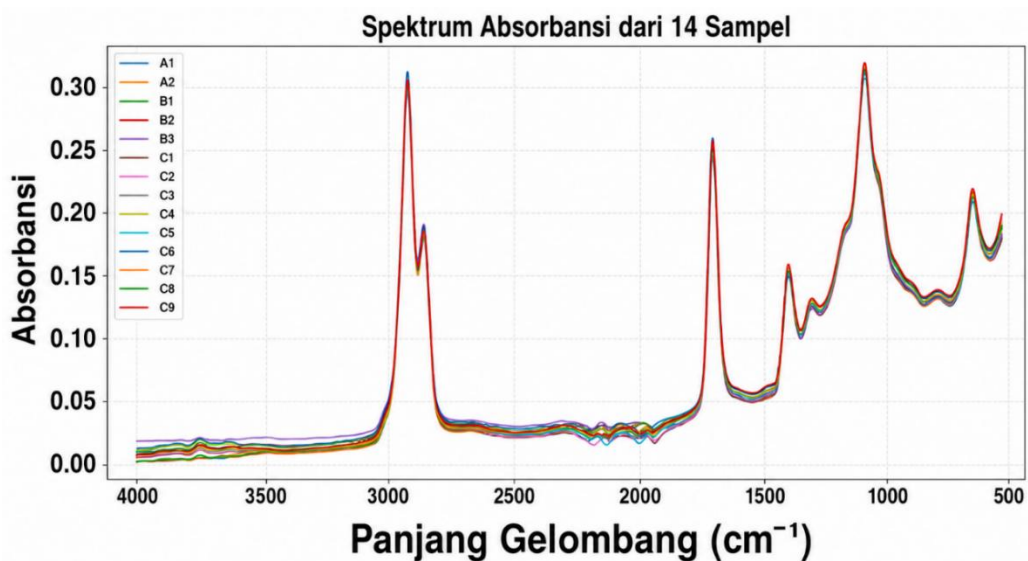
kemasan. Variasi kecil antar kurva mengindikasikan perbedaan komposisi kimia pada setiap kategori minyak.

Keterkaitan antara pola FTIR dan kontras spekel dapat dijelaskan melalui intensitas cahaya yang diteruskan ke detektor. Minyak kemasan dengan transmitansi tinggi menghasilkan intensitas spekel yang lebih stabil, sehingga nilai kontras mencapai titik

tertinggi. Minyak curah menampilkan transmitansi menengah dengan absorbansi lebih besar, yang berdampak pada kontras sedang. Minyak oplosan menunjukkan absorbansi paling besar dan transmitansi rendah, sehingga pola spekelnya cenderung tidak stabil dengan kontras rendah [24].



Gambar 7. Spektrum Transmittansi Sampel Minyak Goreng



Gambar 8. Spektrum Absorbansi Sampel Minyak Goreng

Korelasi ini menegaskan bahwa semakin stabil puncak FTIR, semakin besar nilai kontras yang dihasilkan oleh pola spekel. Stabilitas puncak pada bilangan gelombang 1743 cm^{-1} dan 2920 cm^{-1} terbukti konsisten dengan kontras tinggi pada minyak kemasan [25]. Fluktuasi pada spektrum minyak curah berhubungan dengan nilai kontras sedang, sedangkan ketidakteraturan spektrum minyak oplosan menghasilkan kontras rendah. Hubungan langsung ini memperlihatkan bahwa *Laser Speckle Imaging* dapat digunakan sebagai metode non-destruktif yang selaras dengan FTIR untuk autentikasi minyak goreng.

SIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa *Laser Speckle Imaging* (LSI) dapat digunakan sebagai metode non-destruktif untuk autentikasi minyak goreng. Parameter kontras, intensitas, dan standar deviasi terbukti mampu membedakan minyak kemasan, curah, dan oplosan dengan dukungan analisis *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Grafik proyeksi LDA menunjukkan pemisahan kelas yang jelas sehingga meningkatkan akurasi identifikasi. Hasil pengujian FTIR

memperlihatkan korelasi yang konsisten dengan nilai kontras spekel, menegaskan keandalan pendekatan optik ini. Sistem berbasis LSI portabel berpotensi diterapkan sebagai teknologi praktis untuk memastikan keaslian dan keamanan pangan.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada dosen pembimbing, seluruh dosen fisika Universitas Muhammadiyah Riau dan rekan-rekan yang telah memberikan masukan, semangat, serta kerja sama selama proses penelitian berlangsung.

REFERENSI

- [1] Rahayu RN. Kenaikan Harga Minyak Goreng Kelapa Sawit Di Indonesia Sebuah Analisis Berita Kompas Online. *Badan Riset Dan Inovasi Nasional Kawasan Puspitek Serpong* 2022; 3: 26–37.
- [2] Ramadhan AP, Ro'uf A. Sistem Deteksi Kemurnian Minyak Goreng Dengan Menggunakan Metode Gelombang Ultrasonik. *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)* 2021; 11: 123.
- [3] Halizah AN, Baidhowi. Penjualan minyak oplosan dalam perspektif hukum ekonomi syariah dan perlindungan konsumen: Studi

- kasus Minyakita. *Kampus Akademik Publishing: Jurnal Akademik Ekonomi dan Manajemen* 2025; 2: 319–331.
- [4] Rohim AM, Marwoto P, Priatmoko S, et al. Analysis FTIR Test, Viscosity, Density, Acid Number, and Organoleptic in Bulk Cooking Oil with Packaged Cooking Oil. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* 2023; 9: 2613–2618.
- [5] Kim D, Lee J, Yoon J. Accurate estimation of the inhibition zone of antibiotics based on laser speckle imaging and multiple random speckle illumination. *Comput Biol Med* 2024; 174: 108417.
- [6] Bouzaouia S, Ryckewaert M, Héran D, et al. Using Dynamic Laser Speckle Imaging for Plant Breeding: A Case Study of Water Stress in Sunflowers. *Sensors* 2024; 24: 1–17.
- [7] Postnov DD, Cheng X, Erdener SE, et al. Choosing a laser for laser speckle contrast imaging. *Sci Rep* 2019; 9: 3571–3583.
- [8] Ruan Z, Li R, Dong W, et al. Laser speckle contrast imaging to monitor microcirculation: An effective method to predict outcome in patients with sepsis and septic shock. *Front Bioeng Biotechnol* 2023; 10: 1–11.
- [9] Pieczywek PM, Nosalewicz A, Zdunek A. A novel application of laser speckle imaging technique for prediction of hypoxic stress of apples. *Plant Methods*; 20. Epub ahead of print 2024. DOI: 10.1186/s13007-024-01271-7.
- [10] Neneng Fitrya, Shabri Putra Wirman WF. IDENTIFIKASI KARAKTERISTIK BUAH KELAPA SAWIT SIAP PANEN DENGAN METODE LASER SPEKEL IMAGING (LSI). *Photon* 2018; 9: 1–8.
- [11] Nikzadfar M, Rashvand M, Zhang H, et al. Hyperspectral Imaging Aiding Artificial Intelligence: A Reliable Approach for Food Qualification and Safety. *Applied Sciences (Switzerland)* 2024; 14: 1–33.
- [12] Hsieh MC, Chang CY, Hsu CH, et al. Improvement of clinical wound microcirculation diagnosis using an object tracking-based laser speckle contrast imaging system. *APL Bioeng* 2024; 8: 1–13.
- [13] Seker FB, Fan Z, Gesierich B, et al. Neurovascular Reactivity in the Aging Mouse Brain Assessed by Laser Speckle Contrast Imaging and 2-Photon Microscopy: Quantification by an Investigator-Independent Analysis Tool. *Front Neurol* 2021; 12: 1–13.
- [14] Zhao S, Zhang B, Yang J, et al. Linear discriminant analysis. *Nature Reviews Methods Primers* 2024; 4: 70.
- [15] Zhu F, Gao J, Yang J, et al. Neighborhood linear discriminant analysis. *Pattern Recognit* 2022; 123: 108422.
- [16] Marcellino N, Ratini NN, Sudarsana IWB, et al. Pengaruh Focus Film Distance (FFD) terhadap Nilai Uji

- Kolimasi pada Kolimator Pesawat Sinar-X Stasioner untuk Pemeriksaan Pasien. *Kappa Journal* 2025; 9: 49–57.
- [17] Kalchenko V, Sdobnov A, Meglinski I, et al. A robust method for adjustment of laser speckle contrast imaging during transcranial mouse brain visualization. *Photonics*; 6. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.3390/photonics6030080.
- [18] Wati R, Syah H. 732 Aplikasi Teknologi NIRS Dengan Metode Linear Discriminant Analysis (LDA) untuk Menduga Keaslian Minyak Nilam Yang Dicampur Minyak Terpentin NIRS Technology Application using Linier Discriminant Analysis (LDA) Method To Estimate Authenticity of Patchan. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian* 2022; 7: 732–741.
- [19] Ikhsan AN, Mustafidah M. Penggunaan Paket MASS pada Rstudio untuk Autentikasi Minyak Ikan Patin (*Pangasius micronema*). *Indonesian Journal of Chemometrics and Pharmaceutical Analysis* 2021; 1: 84–93.
- [20] Aleksandrova P V., Zaytsev KI, Nikitin P V., et al. Quantification of attenuation and speckle features from endoscopic OCT images for the diagnosis of human brain glioma. *Sci Rep* 2024; 14: 1–13.
- [21] Rohman A, Ghazali MAB, Windarsih A, et al. Comprehensive Review on Application of FTIR Spectroscopy Coupled with Chemometrics for Authentication Analysis of Fats and Oils in the Food Products. *Molecules* 2020; 25: 5485.
- [22] Rohim AM, Marwoto P, Priatmoko S, et al. Analysis FTIR Test, Viscosity, Density, Acid Number, and Organoleptic in Bulk Cooking Oil with Packaged Cooking Oil. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* 2023; 9: 2613–2618.
- [23] Yulitah D, Dewi R, Krisman. Fabrikasi dan Karakteristik Sifat Optik Dari $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ Menggunakan Spektrofotometer Ultraviolet Visible. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam* 2015; 2: 132–137.
- [24] Khaksari K, Kirkpatrick SJ. Combined effects of scattering and absorption on laser speckle contrast imaging. *J Biomed Opt* 2016; 21: 076002.
- [25] Gholami Khesht S, Kavusi E, Mousavi M. Efficient Detection of Extra Virgin Olive Oil Adulteration via UV and FTIR Spectra in combination with Heat-Mediated Oxidation Method. *Tabari Biomedical Student Research Journal*. Epub ahead of print 2021. DOI: 10.18502/tbsrj.v2i4.5470.