ISSN : 2621 - 1475

Teknologi Computer Vision dan Chemometric untuk Deteksi dan Kontrol Mutu Produk Perikanan: Prinsip, Aplikasi, dan Tantangan

Computer Vision and Chemometric Technologies for Quality Detection and Control of Fishery Products: Principles, Applications, and Challenges

Muhammad Syukri Sadimantara[1*], Suwarjoyowirayatno[2], Sakir[1], Gusti Ray Sadimantara[3], Fahria Nadiryati Sadimantara[4], Nurchalisah Rustan Massinai[1]

[1]Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia
[2]Jurusan Teknologi Hasil Perikanan, Fakultas Perikanan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia
[3]Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia
[4]Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia
* Penulis korespondensi: syukrisadimantara@uho.ac.id

Cara sitasi: Sadimantara, M .S., Suwarjoyowirayatno, Sakir, Sadimantara, G. R., Sadimantara, F. N., & Massinai, N. R. (2026). Teknologi Computer Vision dan Chemometric untuk Deteksi dan Kontrol Mutu Produk Perikanan: Prinsip, Aplikasi, dan Tantangan. *Jurnal Fish Protech*, *9*(2): 267-280.

ABSTRACT

Fresh fishery products such as fish, shrimp, and shellfish are highly nutritious food commodities that are particularly susceptible to quality deterioration caused by endogenous enzymatic activity and microbial spoilage during handling, storage, and distribution along the supply chain. Conventional quality assessment methods, including the subjective quality index method (QIM) and destructive, time-consuming gas chromatography and mass spectrometry, are considered inadequate for rapid and continuous quality monitoring. Advances in spectroscopic technology, electronic sensory sensors, and computer vision combined with chemometric methods offer non-destructive, objective, and potentially online detection alternatives. This article was developed through a narrative literature review approach to examine the principles, developments, and applications of near-infrared spectroscopy, hyperspectral imaging, Raman spectroscopy, fluorescence spectroscopy, nuclear magnetic resonance, electronic nose, electronic tongue, and machine/computer vision integrated with chemometric tools such as principal component analysis (PCA), partial least squares regression (PLSR), and artificial neural networks (ANN) for evaluating fishery product freshness. The review shows that integrating computer vision with chemometrics enables high-accuracy prediction (R^2 in the range of 0.80–0.99) of quality indices such as K-value, total volatile basic nitrogen (TVB-N), histamine, and pH, while also enabling spatial-temporal visualization of quality distribution across whole samples, as demonstrated by multidimensional fluorescence imaging studies on frozen shrimp. Nevertheless, limited model generalizability across species, complex instrumentation requirements, and the performance gap between laboratory testing and industrial application remain major challenges. Future research should focus on portable sensor development, multi-sensor data fusion, and deep learning applications to support real-time, commercially applicable fishery quality detection systems.

Keywords: *computer vision; chemometrics; fishery product quality; fish freshness; near-infrared spectroscopy; non-destructive detection*

ISSN : 2621 - 1475

ABSTRAK

Produk perikanan segar seperti ikan, udang, dan kekerangan merupakan komoditas pangan bernilai gizi tinggi yang rentan mengalami kemunduran mutu akibat aktivitas enzim endogen dan mikroorganisme selama penanganan, penyimpanan, dan distribusi dalam rantai pasok. Metode deteksi mutu konvensional, seperti quality index method (QIM) yang bersifat subjektif serta kromatografi gas dan spektrometri massa yang destruktif dan memerlukan waktu analisis lama, dinilai kurang sesuai untuk pengawasan mutu secara cepat dan berkelanjutan. Perkembangan teknologi spektroskopi, sensor sensorik elektronik, dan computer vision yang dipadukan dengan metode chemometric menawarkan alternatif deteksi non-destruktif yang objektif dan berpotensi diterapkan secara daring. Artikel ini disusun melalui pendekatan narrative literature review untuk mengkaji prinsip kerja, perkembangan, dan aplikasi teknologi near-infrared spectroscopy, hyperspectral imaging, Raman spectroscopy, spektroskopi fluoresensi, electronic nose, electronic tongue, serta machine/computer vision yang dipadukan dengan chemometric seperti principal component analysis (PCA), partial least squares regression (PLSR), dan artificial neural network (ANN) dalam evaluasi kesegaran produk perikanan. Hasil kajian menunjukkan integrasi computer vision dengan chemometric mampu memprediksi indikator mutu seperti nilai K, total volatile basic nitrogen (TVB-N), histamin, dan pH dengan akurasi tinggi (R^2 pada kisaran 0,80–0,99), sekaligus memungkinkan visualisasi spasial-temporal distribusi mutu pada sampel utuh, sebagaimana ditunjukkan pada studi pencitraan fluoresensi multidimensi udang beku. Namun, keterbatasan generalisasi model antarspesies, kebutuhan perangkat keras yang kompleks, serta kesenjangan performa antara pengujian laboratorium dan aplikasi industri masih menjadi tantangan utama. Riset ke depan diarahkan pada pengembangan sensor portabel, fusi data multisensor, dan pemanfaatan deep learning guna mendukung sistem deteksi mutu perikanan yang real-time dan dapat diterapkan secara komersial.

Kata kunci: *computer vision; chemometric; mutu produk perikanan; kesegaran ikan; near-infrared spectroscopy; deteksi non-destruktif*

PENDAHULUAN

Produk perikanan merupakan salah satu sumber pangan bernilai gizi tinggi karena mengandung protein berkualitas, asam lemak tak jenuh, dan mineral esensial yang dibutuhkan tubuh manusia. Namun, kandungan protein dan lemak pada produk perikanan segar sangat mudah terdegradasi oleh aktivitas enzim endogen maupun mikroorganisme selama penyimpanan dan transportasi, sehingga menyebabkan kemunduran mutu yang cepat dibandingkan komoditas pangan lain (Wei *et al*., 2024; Zhuang *et al*., 2021). Perubahan mutu tersebut umumnya ditandai dengan kehilangan air, perubahan warna, degradasi protein dan pelunakan tekstur, dekomposisi nukleotida, akumulasi senyawa berbasis nitrogen, serta oksidasi lipid dan protein, yang secara kolektif mengikuti tiga fase pascapanen utama, yaitu pre-rigor, rigor mortis, dan autolisis yang berlanjut pada pembusukan mikrobial (Wei *et al*., 2024).

Deteksi kemunduran mutu produk perikanan secara konvensional umumnya mengandalkan quality index method (QIM) yang membutuhkan panelis terlatih dan bersifat subjektif (Costell, 2002), serta metode instrumental seperti kromatografi gas (GC) dan spektrometri massa (MS) yang meskipun akurat, bersifat destruktif dan memerlukan waktu analisis yang relatif lama (Barbosa-Pereira *et al*., 2012; Dehaut *et al*., 2016). Keterbatasan tersebut mendorong pengembangan teknologi deteksi cerdas yang non-destruktif, cepat, dan objektif, di antaranya teknologi spektroskopi (near-infrared, hyperspectral imaging, Raman, fluoresensi, dan nuclear magnetic resonance), sensor sensorik elektronik (electronic nose dan electronic tongue), serta machine/computer vision (Wei *et al*., 2024; He *et al*., 2015). Teknologi-teknologi tersebut umumnya tidak berdiri sendiri, melainkan

ISSN : 2621 - 1475

dipadukan dengan metode chemometric seperti principal component analysis (PCA), partial least squares regression (PLSR), dan artificial neural network (ANN) untuk membangun model matematis yang menghubungkan data spektral atau citra dengan parameter mutu produk perikanan secara kuantitatif maupun kualitatif (Wei *et al*., 2024).

Perkembangan mutakhir juga menunjukkan bahwa pendekatan pencitraan berdimensi jamak, seperti pencitraan fluoresensi multidimensi yang memadukan kamera charge-coupled device (CCD) dengan data excitation-emission matrix (EEM), mampu memvisualisasikan distribusi mutu secara spasial-temporal pada sampel utuh, sesuatu yang tidak dapat dicapai oleh pengukuran spektroskopi titik tunggal (Rahman *et al*., 2021). Hal ini membuka peluang penerapan computer vision tidak hanya untuk evaluasi warna atau morfologi, tetapi juga sebagai sarana visualisasi indikator kimiawi mutu seperti nilai K secara non-destruktif dan real-time.

Berdasarkan uraian tersebut, artikel ini disusun untuk memberikan kajian komprehensif mengenai prinsip kerja, perkembangan penelitian, dan aplikasi teknologi computer vision dan chemometric dalam deteksi dan kontrol mutu produk perikanan, sekaligus mengidentifikasi tantangan dan arah pengembangan penelitian pada masa mendatang.

METODOLOGI

Artikel ini disusun menggunakan pendekatan narrative literature review yang bertujuan mengkaji perkembangan penerapan computer vision dan chemometric pada kontrol mutu produk perikanan dari berbagai sumber pustaka primer. Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ilmiah seperti Scopus, ScienceDirect, Web of Science, dan Google Scholar, dengan menggunakan kata kunci antara lain “computer vision fish quality”, “chemometrics seafood freshness”, “hyperspectral imaging fish”, “electronic nose fish freshness”, dan “fluorescence imaging shrimp K-value”. Artikel yang menjadi rujukan utama meliputi kajian ulas komprehensif mengenai teknologi deteksi dan kontrol mutu produk akuatik segar dalam rantai pasok (Wei *et al*., 2024), serta studi eksperimental mengenai pemantauan kesegaran udang beku menggunakan pencitraan fluoresensi multidimensi yang dipadukan dengan chemometric (Rahman *et al*., 2021).

Tahap kajian dilakukan melalui identifikasi, seleksi artikel yang relevan (terutama publikasi tahun 2000–2024), pengelompokan berdasarkan tema utama, yaitu (1) karakteristik kemunduran mutu produk perikanan, (2) prinsip chemometric sebagai basis analisis data spektral, (3) teknologi spektroskopi untuk deteksi mutu, (4) sensor sensorik elektronik, (5) teknologi computer vision, (6) integrasi multi-teknologi, dan (7) tantangan serta prospek pengembangan, kemudian dilanjutkan dengan sintesis informasi secara naratif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Kemunduran Mutu Produk Perikanan

Rantai pasok produk perikanan segar umumnya terbagi menjadi tiga tahap, yaitu hulu (pra-panen, panen, dan pascapanen awal), tengah (penyortiran, penyimpanan, transportasi, dan pengolahan), serta hilir (pasar, ritel, dan konsumen) (Wei *et al*., 2024). Pada setiap tahap tersebut, produk perikanan berisiko mengalami kemunduran mutu akibat kondisi penyimpanan dan penanganan yang tidak optimal, terutama apabila rantai dingin tidak terjaga secara konsisten. Perubahan mutu pascapanen pada

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

sebagian besar produk perikanan terjadi melalui tiga fase, yaitu fase pra-rigor yang ditandai penurunan pH akibat metabolisme anaerob, fase rigor mortis akibat penurunan ATP yang menyebabkan otot mengeras, serta fase autolisis dan pembusukan mikrobial yang menyebabkan pelunakan tekstur dan pembentukan senyawa off-odor seperti amina biogenik dan senyawa berbasis sulfur (Wei *et al*., 2024).

Indikator mutu yang umum digunakan untuk memantau kemunduran mutu produk perikanan meliputi nilai K (rasio senyawa hasil degradasi ATP), total volatile basic nitrogen (TVB-N), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), pH, total viable count (TVC), dan kadar histamin, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Indikator mutu produk perikanan dan metode analisis konvensional

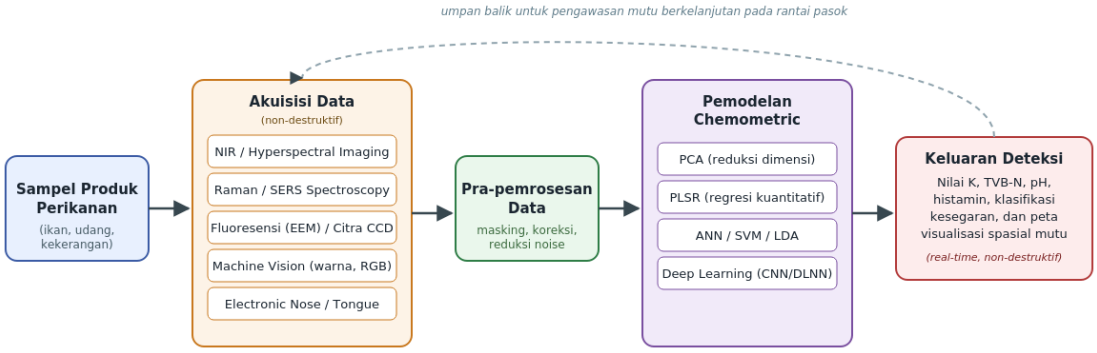
Indikator Mutu	Prinsip/Makna	Metode Analisis Konvensional	Referensi
Nilai K (%)	Rasio senyawa hasil degradasi ATP (HxR + Hx) terhadap total metabolit ATP; meningkat seiring penurunan kesegaran	HPLC	(Wei *et al*., 2024; Rahman *et al*., 2021; Kato *et al*., 2009)
TVB-N	Akumulasi senyawa nitrogen volatil (amonia, amina) akibat aktivitas bakteri dan enzim	Destilasi/titrasi, GC-MS	(Wei *et al*., 2024; Barbosa-Pereira *et al*., 2012; Dehaut *et al*., 2016)
TBARS	Indikator oksidasi lipid pada daging ikan/udang	Uji spektrofotometri	(Wei *et al*., 2024)
pH	Perubahan akibat degradasi ATP, glikolisis, dan akumulasi basa nitrogen	pH meter	(Wei *et al*., 2024; Rahman *et al*., 2021)
Histamin	Senyawa toksik hasil dekarboksilasi histidin oleh bakteri pembusuk	HPLC, ELISA	(Ghidini *et al*., 2021; Zhang *et al*., 2022)
Total Viable Count (TVC)	Jumlah mikroorganisme total sebagai indikator kontaminasi mikrobial	Metode plate count	(Wei *et al*., 2024)

Chemometric sebagai Basis Analisis Data Spektral dan Citra

Chemometric merupakan seperangkat metode statistik dan matematis yang digunakan untuk mengekstraksi informasi relevan dari data spektral maupun citra berdimensi tinggi, serta membangun model prediktif yang menghubungkan data tersebut dengan parameter mutu produk (Wei *et al*., 2024; He *et al*., 2015). Metode chemometric yang umum digunakan antara lain principal component analysis (PCA) untuk reduksi dimensi dan eksplorasi pola data, partial least squares regression (PLSR) untuk pemodelan kuantitatif hubungan antara spektrum dan konsentrasi senyawa target, serta metode klasifikasi seperti linear discriminant analysis (LDA), support vector machine (SVM), dan artificial neural network (ANN) untuk membedakan kategori kesegaran produk (Wei *et al*., 2024). Pada perkembangan terbaru, deep learning neural network (DLNN) turut diadopsi untuk meningkatkan akurasi prediksi pada data hyperspectral imaging maupun pencitraan fluoresensi berdimensi tinggi (Moosavi-Nasab *et al*., 2021). Peran chemometric menjadi krusial karena data spektral maupun citra mentah umumnya berdimensi sangat besar sehingga tidak praktis digunakan secara langsung; melalui seleksi panjang gelombang atau fitur yang paling

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

informatif, chemometric memungkinkan pembangunan model prediksi yang lebih ringkas namun tetap akurat, sebagaimana ditunjukkan pada studi pemilihan panjang gelombang eksitasi optimal (330 nm) untuk pencitraan fluoresensi udang beku yang mereduksi ratusan pasangan panjang gelombang EEM menjadi hanya satu panjang gelombang eksitasi tanpa penurunan akurasi yang berarti (Rahman *et al*., 2021).



Gambar 1. Diagram alur konseptual sistem deteksi mutu produk perikanan berbasis computer vision dan chemometric, disusun berdasarkan sintesis kajian pustaka (Wei *et al*., 2024; Rahman *et al*., 2021; He *et al*., 2015).

Teknologi Spektroskopi untuk Deteksi Mutu Produk Perikanan

Near-Infrared (NIR) Spectroscopy. Spektroskopi NIR memanfaatkan penyerapan cahaya oleh gugus mengandung hidrogen (C–H, C–O, N–H, O–H) yang menghasilkan spektrum absorbansi atau refleksi yang mencerminkan komposisi kimia sampel (He *et al*., 2015). Teknologi ini telah digunakan secara luas untuk memprediksi pH, kekerasan, adhesivitas, dan viskositas fillet ikan (Wangtueai *et al*., 2021), konsentrasi histamin pada tuna mentah maupun olahan dengan model orthogonal partial least squares regression (Ghidini *et al*., 2021), serta nilai K ikan segar yang disimpan pada suhu rendah menggunakan kombinasi FT-NIR dengan algoritme seleksi variabel seperti ACO-PLS yang mencapai koefisien korelasi hingga 97–98% (Agyekum *et al*., 2020). Selain evaluasi mutu, NIR portabel (handheld) juga terbukti mampu mengidentifikasi spesies ikan seperti cod dan haddock dengan akurasi tinggi menggunakan model LDA dan SIMCA (Grassi *et al*., 2018).

Hyperspectral Imaging (HSI). HSI memadukan spektroskopi konvensional dengan pencitraan computer vision sehingga menghasilkan data yang mengandung informasi spektral sekaligus spasial (Wei *et al*., 2024). Keunggulan HSI terletak pada kemampuannya mendeteksi kerusakan mutu tanpa bahan kimia dan kebutuhan preparasi sampel yang minimal, sehingga berpotensi untuk deteksi daring secara real-time (Wei *et al*., 2024; Wang *et al*., 2019). Aplikasi HSI telah dilaporkan pada klasifikasi kesegaran ikan kuroaker kuning dengan akurasi 96,88% menggunakan kombinasi panjang gelombang dan fitur tekstur (Shao *et al*., 2023), prediksi kandungan TVB-N pada fillet ikan trout pelangi menggunakan deep learning neural network (Moosavi-Nasab *et al*., 2021), serta visualisasi distribusi kelembutan (tenderness) pada fillet salmon (He *et al*., 2014). Namun demikian, HSI memerlukan perangkat keras dan perangkat lunak dengan kapasitas pemrosesan data yang besar, sehingga kecepatan pemrosesan informasinya relatif lebih lambat dibandingkan NIR konvensional (Wei *et al*., 2024).

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

Raman Spectroscopy dan Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS). Spektroskopi Raman memanfaatkan efek hamburan Raman untuk mengkaji keberadaan gugus fungsional dan ikatan kimia. Teknik surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) yang dipadukan dengan kromatografi lapis tipis terderivatisasi terbukti mampu mendeteksi histamin pada tuna secara real-time dengan batas deteksi sangat rendah (9 ppb) (Zhang *et al*., 2022). Pengembangan lebih lanjut berupa spatially off-set Raman spectroscopy (SORS) memungkinkan analisis biokimia pada lapisan permukaan maupun subpermukaan sampel ikan secara non-invasif, termasuk perbedaan komposisi lipid, protein, dan karotenoid antar-spesies maupun antarbagian tubuh ikan (Landry *et al*., 2020).

Spektroskopi Fluoresensi dan Pencitraan Fluoresensi Multidimensi. Spektroskopi fluoresensi memanfaatkan perubahan spektrum fluoresensi senyawa seperti asam amino aromatik dan nicotinamide adenine dinucleotide (NADH) yang berubah seiring proses penyimpanan (Karoui *et al*., 2021). Front-face fluorescence spectroscopy (FFFS) terbukti efektif membedakan jumlah siklus beku-cair pada fillet ikan kakap dengan tingkat klasifikasi yang tepat mencapai 91,67% (Karoui *et al*., 2021). Perkembangan yang lebih maju ditunjukkan oleh studi pencitraan fluoresensi multidimensi pada udang beku yang memadukan data excitation-emission matrix (EEM) dari spektrofotometer fluoresensi dengan kamera CCD (Rahman *et al*., 2021). Pada studi tersebut, model PLSR berbasis EEM mampu memprediksi nilai K dan pH udang beku masing-masing dengan R^2 = 0,98 dan R^2 = 0,95 menggunakan 434 pasangan panjang gelombang eksitasi-emisi. Melalui seleksi panjang gelombang eksitasi paling informatif (330 nm) dan 24 panjang gelombang emisi terkait (380–610 nm), model pencitraan fluoresensi mampu memprediksi nilai K dengan R^2 = 0,80 dan memvalidasi visualisasi tersebut pada kelompok udang dengan metode pembunuhan berbeda, menghasilkan peta distribusi mutu yang menunjukkan variasi

kesegaran baik antarindividu udang maupun antarbagian tubuh udang, misalnya nilai K yang lebih tinggi pada bagian ekor akibat reaksi melanosis yang lebih cepat (Rahman *et al*., 2021). Pendekatan ini menegaskan bahwa pencitraan fluoresensi dapat berfungsi sebagai bentuk computer vision yang mampu memvisualisasikan indikator kimiawi mutu secara spasial, sesuatu yang tidak dapat dicapai oleh pengukuran EEM titik tunggal maupun oleh sistem computer vision berbasis warna konvensional (Rahman *et al*., 2021; Rahman *et al*., 2019; ElMasry *et al*., 2015; Bui *et al*., 2018).

Nuclear Magnetic Resonance (NMR). NMR digunakan untuk menentukan struktur molekul dan memantau perubahan metabolit selama proses pembusukan produk perikanan. Teknik low-field NMR (LF-NMR) mampu mengidentifikasi perubahan mobilitas proton daging ikan akibat siklus beku-cair (Al-Habsi *et al*., 2017), sementara NMR resolusi tinggi mampu mengidentifikasi hingga 21 metabolit yang berubah selama proses pembusukan ikan zebra, termasuk akumulasi asetat dan penurunan asam laktat sebagai penanda kesegaran (Tan *et al*., 2018). Meskipun akurat, NMR kurang sesuai untuk aplikasi produksi skala industri karena membutuhkan peralatan mahal dan operasional yang kompleks, sehingga penggunaannya masih terbatas pada penelitian laboratorium (Wei *et al*., 2024).

Ringkasan perbandingan karakteristik teknologi spektroskopi untuk deteksi mutu produk perikanan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan karakteristik teknologi spektroskopi untuk deteksi mutu produk perikanan

Teknik	Indikator Mutu Utama	Metode Chemometric	Akurasi Model (Contoh)	Keterbatasan Utama
NIR	pH, TVB-N, K-value, histamin	PLS, PLSR, LDA, SIMCA	R^2 0,72–0,99 (Wangtueai *et al*., 2021; Ghidini *et al*., 2021; Agyekum *et al*., 2020; Grassi *et al*., 2018; Zhou *et al*., 2019)	Sensitif komposisi permukaan sampel
Hyperspectral Imaging	TVB-N, tekstur, klasifikasi kesegaran	PLSR, CARS-PLS, DLNN	Akurasi klasifikasi hingga 96,88% (Shao *et al*., 2023)	Perangkat keras/lunak kompleks, proses lambat
Raman/SERS	Histamin, bakteri, komposisi subpermukaan	PLSR, ANN, LDA, PCA	LOD 9 ppb histamin (Zhang *et al*., 2022)	Umumnya untuk deteksi target spesifik
Fluoresensi/EEM Imaging	Nilai K, pH, siklus beku-cair	PLSR	R^2 0,80–0,99 (Rahman *et al*., 2021; Karoui *et al*., 2021)	Terpengaruh faktor lingkungan (suhu, kelembapan)
NMR	Nilai K, TMA-N, profil metabolit	PLS-DA, OPLS-DA	Signifikan $p<0,5$ (Tan *et al*., 2018)	Biaya tinggi, operasional kompleks

Sensor Sensorik Elektronik: Electronic Nose dan Electronic Tongue

Electronic nose (e-nose) bekerja berdasarkan susunan sensor gas yang menghasilkan sinyal elektrik saat mendeteksi senyawa volatil hasil pembusukan, kemudian diproses melalui sistem pengenalan pola untuk mengklasifikasikan tingkat kesegaran (Wei *et al*., 2024). Studi menunjukkan e-nose berbasis metal oxide sensor mampu mengklasifikasikan kesegaran ikan layur pada berbagai suhu penyimpanan dengan korelasi tinggi terhadap TVB-N dan TVC (Tian *et al*., 2012), serta digunakan untuk memantau perubahan massa udang putih Pasifik selama penyimpanan es maupun non-es (Srinivasan *et al*., 2020). Pada deteksi kepiting, kombinasi teknologi machine olfactory dengan deep learning berupa stacked denoising autoencoder dan support vector machine mencapai akurasi pengenalan hingga 96,67% (Zhu *et al*., 2019).

Electronic tongue (e-tongue) mengadopsi prinsip serupa pada sistem pengecapan biologis, mengubah karakteristik rasa media cair menjadi sinyal elektrik melalui susunan sensor potensiometrik atau voltametrik (Wei *et al*., 2024). E-tongue terbukti mampu memprediksi kandungan TVB-N, amina biogenik, dan indikator mutu lain pada fillet ikan kakap dengan korelasi lebih dari 0,95 (Gil *et al*., 2008). Kombinasi e-nose dan e-tongue, seperti pada model PCA-rbfnn untuk evaluasi kesegaran tilapia pada berbagai suhu penyimpanan, menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan penggunaan sensor tunggal karena mampu menangkap dimensi informasi rasa dan aroma secara simultan (Shi *et al*., 2018).

Teknologi Computer Vision untuk Evaluasi Mutu Visual

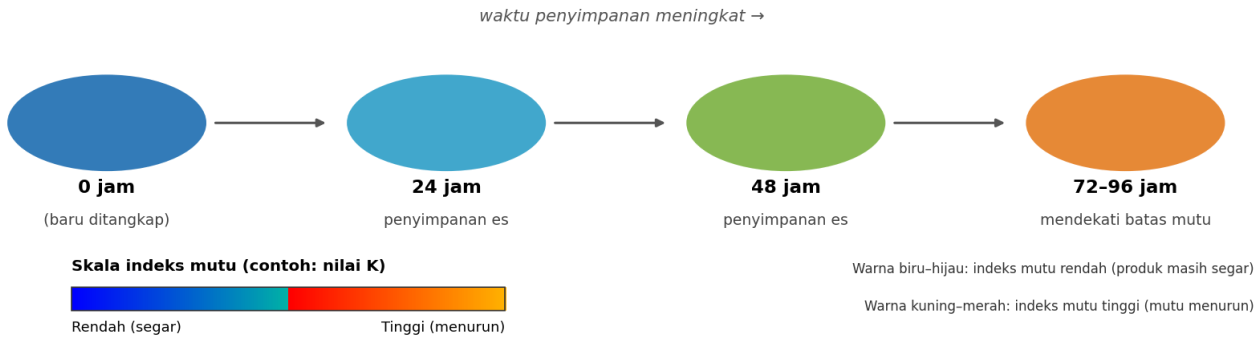
Sistem computer vision umumnya bekerja melalui tahapan akuisisi citra menggunakan elemen optik/non-optik, pemrosesan citra digital,

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

ekstraksi fitur (warna, bentuk, tekstur), hingga keluaran hasil evaluasi mutu (Wei *et al*., 2024; Wu & Sun, 2013). Warna merupakan indikator visual intuitif yang paling umum digunakan untuk menilai kesegaran produk perikanan, khususnya pada bagian mata, insang, dan kulit ikan. Sejumlah studi menunjukkan bahwa perubahan warna mata dan insang ikan trout pelangi dapat digunakan untuk memprediksi kesegaran menggunakan jaringan saraf tiruan (ANN) dan support vector machine (SVM), dengan warna insang terbukti lebih efektif membedakan lama penyimpanan dibandingkan warna mata (Lalabadi *et al*., 2020). Model computer vision berbasis Artificial Bee Colony-ANN pada ikan mas mampu mengklasifikasikan kesegaran dengan akurasi 93,01% (Taheri-Garavand *et al*., 2019), sementara evaluasi pada ikan Roho Labeo mencapai akurasi penentuan hingga 96,67% (Banwari *et al*., 2022).

Perkembangan lebih lanjut menunjukkan bahwa model computer vision tidak lagi terbatas pada satu titik lesi (misalnya hanya mata atau hanya insang), melainkan mampu memfokuskan analisis pada beberapa jaringan utama sekaligus, seperti mata, insang, dan kulit, sekaligus menghitung indeks kesegaran ikan (Q-score) melalui perhitungan matematis multifokal, dengan akurasi hingga 98,07% dibandingkan metode laboratorium standar (Arora *et al*., 2022). Pendekatan ini mengurangi risiko bias akibat fokus pada satu bagian jaringan saja, meskipun tetap membutuhkan kalibrasi terhadap faktor sumber cahaya, kekasaran permukaan sampel, dan geometri instrumen pengukuran (Wei *et al*., 2024).

Menariknya, konsep computer vision dalam kajian ini juga mencakup pencitraan berbasis fluoresensi sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya, di mana kamera CCD digunakan untuk menangkap citra fluoresensi udang pada panjang gelombang emisi terpilih, kemudian nilai K dan pH divisualisasikan sebagai peta warna (colour map) pada seluruh permukaan sampel (Rahman *et al*., 2021). Pendekatan ini memperluas cakupan computer vision dari sekadar evaluasi warna permukaan menjadi visualisasi indikator kimiawi mutu secara kuantitatif dan spasial, yang berpotensi besar diterapkan pada klasifikasi lot produk perikanan skala komersial.



Gambar 2. Ilustrasi konsep visualisasi spasial-temporal mutu produk perikanan selama penyimpanan, disusun berdasarkan prinsip pencitraan fluoresensi multidimensi pada udang (Rahman *et al*., 2021). Skema bersifat konseptual dan tidak mereproduksi data hasil penelitian.

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

Ringkasan berbagai aplikasi computer vision pada evaluasi kesegaran produk perikanan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Aplikasi computer vision pada evaluasi kesegaran produk perikanan

Spesies	Indikator/Objek Citra	Metode	Akurasi	Referensi
Ikan mas (Common carp)	Citra seluruh tubuh ikan	Artificial Bee Colony-ANN	93,01%	(Taheri-Garavand *et al*., 2019)
Ikan trout pelangi	Warna mata dan insang	ANN dan SVM	Insang lebih akurat dari mata	(Lalabadi *et al*., 2020)
Roho Labeo	Citra tubuh ikan	Model klasifikasi computer vision	96,67%	(Banwari *et al*., 2022)
Berbagai spesies ikan	Mata, insang, kulit (multifokal)	Model matematis Q-score	98,07%	(Arora *et al*., 2022)
Udang beku (Pandalus hypsinotus)	Citra fluoresensi (nilai K, pH)	Kamera CCD + PLSR (EEM)	R^2 = 0,80 (K-value); R^2 = 0,53 (pH)	(Rahman *et al*., 2021)

Integrasi Computer Vision dan Chemometric: Menuju Sistem Deteksi Cerdas

Integrasi computer vision dan chemometric menghasilkan sistem deteksi mutu yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan salah satu teknologi secara terpisah. Studi pencitraan fluoresensi multidimensi pada udang beku menunjukkan bahwa pemilihan panjang gelombang optimal melalui model PLSR berulang dapat mereduksi kompleksitas data EEM sekaligus mempertahankan akurasi prediksi yang tinggi, sehingga memungkinkan visualisasi dua indikator mutu (nilai K dan pH) secara simultan dari citra yang sama (Rahman *et al*., 2021). Pendekatan serupa juga diterapkan pada fusi data multisensor, misalnya kombinasi electronic nose, electronic tongue, dan kolorimeter pada evaluasi kesegaran ikan kembung yang terbukti menghasilkan prediksi lebih baik dibandingkan data sensor tunggal (Wei *et al*., 2024). Adopsi deep learning, seperti deep learning neural network (DLNN) pada data hyperspectral imaging (Moosavi-Nasab *et al*., 2021) dan stacked denoising autoencoder pada data machine olfactory (Zhu *et al*., 2019), turut menunjukkan tren peningkatan kapasitas ekstraksi fitur otomatis yang mengurangi ketergantungan pada seleksi fitur manual.

Tren pengembangan ke depan mengarah pada sistem pemantauan mutu yang terintegrasi dengan Internet of Things (IoT) untuk mendukung pengawasan real-time di sepanjang rantai pasok, mulai dari lokasi produksi hingga ritel (Wei *et al*., 2024; Niu *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2023). Integrasi ini penting mengingat kemunduran mutu produk perikanan dapat terjadi dengan sangat cepat, sehingga keterlambatan umpan balik hasil deteksi dapat mengurangi efektivitas pengendalian mutu secara keseluruhan.

Tantangan dan Prospek Pengembangan

- **Keterbatasan Generalisasi Model Antarspesies:** Sebagian besar model chemometric dan computer vision dikembangkan menggunakan sampel dari spesies dan wilayah tertentu, sehingga penerapannya pada spesies atau kondisi lain memerlukan validasi ulang (Wei *et al*., 2024).

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

- **Kompleksitas dan Biaya Instrumentasi:** Teknologi seperti hyperspectral imaging dan NMR memerlukan perangkat keras serta perangkat lunak dengan kapasitas pemrosesan besar, sehingga biaya investasi dan waktu pemrosesan data menjadi kendala pada skala komersial (Wei *et al*., 2024).
- **Sensitivitas terhadap Faktor Lingkungan:** Hasil spektroskopi fluoresensi dan sinyal e-nose sangat dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, dan kondisi pengukuran, sehingga memerlukan kalibrasi dan optimasi sensor lebih lanjut (Wei *et al*., 2024).
- **Kesenjangan antara Uji Laboratorium dan Aplikasi Industri:** Kondisi aktual pada rantai pasok dapat sangat berbeda dari kondisi laboratorium, sehingga performa deteksi di lapangan sering kali tidak sebaik hasil pengujian awal (Wei *et al*., 2024).
- **Kebutuhan Deteksi Real-Time dan Non-Destruktif:** Permintaan industri terhadap pemantauan mutu daring yang cepat mendorong pengembangan sensor portabel dan sistem berbasis IoT yang dapat mengurangi waktu tunggu hasil deteksi (Wei *et al*., 2024; Niu *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2023).

Arah pengembangan penelitian diproyeksikan berfokus pada miniaturisasi dan portabilitas sensor, fusi data multisensor (spektral, citra, dan sensor sensorik elektronik), penerapan algoritme deep learning untuk ekstraksi fitur otomatis, serta standardisasi protokol pengujian lintas spesies dan lintas laboratorium agar teknologi computer vision dan chemometric dapat diadopsi secara lebih luas dalam sistem kontrol mutu produk perikanan komersial (Wei *et al*., 2024; Rahman *et al*., 2021; Niu *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2023).

KESIMPULAN

Kajian ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi computer vision dengan metode chemometric memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem deteksi dan kontrol mutu produk perikanan yang non-destruktif, objektif, dan berpotensi diterapkan secara real-time. Berbagai teknologi spektroskopi, seperti near-infrared, hyperspectral imaging, Raman, fluoresensi, dan NMR, telah terbukti mampu memprediksi indikator mutu utama seperti nilai K, TVB-N, histamin, dan pH dengan akurasi tinggi apabila dipadukan dengan chemometric yang tepat. Di sisi lain, teknologi computer vision, baik berbasis warna konvensional maupun pencitraan fluoresensi multidimensi, memperluas kapabilitas deteksi dari sekadar evaluasi visual menjadi visualisasi spasial-temporal indikator kimiawi mutu pada sampel utuh, sebagaimana ditunjukkan pada studi pencitraan fluoresensi udang beku yang menjadi salah satu rujukan utama kajian ini. Meskipun demikian, tantangan terkait generalisasi model antarspesies, kompleksitas instrumentasi, sensitivitas terhadap faktor lingkungan, dan kesenjangan antara performa laboratorium dengan aplikasi industri masih perlu diatasi. Pengembangan sensor portabel, fusi data multisensor, serta pemanfaatan deep learning diproyeksikan menjadi arah utama penelitian mendatang guna mewujudkan sistem deteksi mutu produk perikanan yang efisien, akurat, dan dapat diterapkan secara luas dalam rantai pasok komersial.

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

DAFTAR PUSTAKA

Agyekum, A.A., Kutsanedzie, F.Y.H., Annavaram, V., Mintah, B.K., Asare, E.K., & Wang, B. (2020). FT-NIR coupled chemometric methods rapid prediction of K-value in fish. *Vibrational Spectroscopy*, 108. https://doi.org/10.1016/J.VIBSPEC.2020.103044

Al-Habsi, N.A., Al-Hadhrami, S., Al-Kasbi, H., & Rahman, M.S. (2017). Molecular mobility of fish flesh measured by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) relaxation: effects of freeze-thaw cycles. *Fisheries Science*, 83, 845–851. https://doi.org/10.1007/s12562-017-1114-0

Arora, M., Mangipudi, P., & Dutta, M.K. (2022). A low-cost imaging framework for freshness evaluation from multifocal fish tissues. *Journal of Food Engineering*, 314. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110777

Banwari, A., Joshi, R.C., Sengar, N., & Dutta, M.K. (2022). Computer vision technique for freshness estimation from segmented eye of fish image. *Ecological Informatics*, 69. DOI:10.1016/j.ecoinf.2022.101602

Barbosa-Pereira, L., Otero-Pazos, P., Rodriguez-Bernaldo de Quiros, A., Sendon, R., Vecino, X., Cruz, J.M., *et al*. (2012). SPME-GC method for the determination of volatile amines as indices of freshness in fish samples. *Italian Journal of Food Science*, 24, 211–214.

Bui, M.V., Rahman, M.M., Nakazawa, N., Okazaki, E., & Nakauichi, S. (2018). Visualize the quality of frozen fish using fluorescence imaging aided with excitation-emission matrix. *Optics Express*, 26, 22954–22964. https://doi.org/10.1364/oe.26.022954

Costell, E. (2002). A comparison of sensory methods in quality control. *Food Quality and Preference*, 13, 341–353. DOI:10.1016/S0950-3293(02)00020-4

Dehaut, A., Duthen, S., Grard, T., Krzewinski, F., N'Guessan, A., Brisabois, A., *et al*. (2016). Development of an SPME-GC-MS method for the specific quantification of dimethylamine and trimethylamine: use of a new ratio for the freshness monitoring of cod fillets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96, 3787–3794. https://doi.org/10.1002/jsfa.

ElMasry, G., Nagai, H., Moria, K., Nakazawa, N., Tsuta, M., Sugiyama, J., *et al*. (2015). Freshness estimation of intact frozen fish using fluorescence spectroscopy and chemometrics of excitation-emission matrix. *Talanta*, 143, 145–156. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.05.031

Ghidini, S., Chiesa, L.M., Panseri, S., Varra, M.O., Ianieri, A., Pessina, D., *et al*. (2021). Histamine control in raw and processed tuna: a rapid tool based on NIR spectroscopy. *Foods*, 10. https://doi.org/10.3390/foods10040885

Gil, L., Barat, J.M., Garcia-Breijo, E., Ibanez, J., Martinez-Manez, R., Soto, J., *et al*. (2008). Fish freshness analysis using metallic potentiometric electrodes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 131, 362–370. https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.11.052

Grassi, S., Casiraghi, E., & Alamprese, C. (2018). Handheld NIR device: a non-targeted approach to assess authenticity of fish fillets and patties. *Food Chemistry*, 243, 382–388. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.145

He, H.J., Wu, D., & Sun, D.W. (2014). Potential of hyperspectral imaging combined with chemometric analysis for assessing and

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

visualising tenderness distribution in raw farmed salmon fillets. *Journal of Food Engineering*, 126, 156–164. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.11.015

He, H.J., Wu, D., & Sun, D.W. (2015). Nondestructive spectroscopic and imaging techniques for quality evaluation and assessment of fish and fish products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55, 864–886. DOI:10.1080/10408398.2012.746638

Huang, J.J., Zhang, M., Mujumdar, A.S., & Ma, Y.M. (2023). Technological innovations enhance postharvest fresh food resilience from a supply chain perspective. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. DOI: 10.1080/10408398.2023.2232464

Karoui, R., Boughattas, F., & Chene, C. (2021). Classification of sea bream (Sparus aurata) fillets subjected to freeze-thaw cycles by using front-face fluorescence spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 308. 10.1016/j.jfoodeng.2021.110678

Kato, N., Kunimoto, M., Koseki, S., Kitakami, S., & Arai, K. (2009). Freshness and quality of fish and shellfish (supplementary edition). *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 7, 87–99.

Lalabadi, H.M., Sadeghi, M., & Mireei, S.A. (2020). Fish freshness categorization from eyes and gills color features using multi-class artificial neural network and support vector machines. *Aquacultural Engineering*, 90. DOI:10.1016/j.aquaeng.2020.102076

Landry, J.D., Torley, P.J., & Blanch, E.W. (2020). Detection of biomarkers relating to quality and differentiation of some commercially significant whole fish using spatially off-set Raman spectroscopy. *Molecules*, 25. https://doi.org/10.3390/molecules25173776

Moosavi-Nasab, M., Khoshnoudi-Nia, S., Azimifar, Z., & Kamyab, S. (2021). Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis. *Scientific Reports*, 11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84659-y

Niu, H.H., Zhang, M., Shen, D.B., Mujumdar, A.S., & Ma, Y.M. (2023). Sensing materials for fresh food quality deterioration measurement: a review of research progress and application in supply chain. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. DOI: 10.1080/10408398.2023.2195939

Rahman, M.M., Shibata, M., ElMasry, G., Nakazawa, N., Nakauichi, S., Hagiwara, T., *et al*. (2019). Expeditious prediction of post-mortem changes in frozen fish meat using three-dimensional fluorescence fingerprints. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 83, 901–913. DOI: 10.1080/09168451.2019.1569494

Rahman, M.M., Bui, M.V., Shibata, M., Nakazawa, N., Rithu, M.N.A., Yamashita, H., *et al*. (2021). Rapid noninvasive monitoring of freshness variation in frozen shrimp using multidimensional fluorescence imaging coupled with chemometrics. *Talanta*, 224, 121871. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121871

Shao, Y.Y., Shi, Y.K., Wang, K.L., Li, F.F., Zhou, G.Y., & Xuan, G.T. (2023). Detection of small yellow croaker freshness by hyperspectral imaging. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115. DOI:10.1016/j.jfca.2022.104980

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

Shi, C., Yang, X.T., Han, S., Fan, B.L., Zhao, Z.Y., Wu, X.M., *et al*. (2018). Nondestructive prediction of tilapia fillet freshness during storage at different temperatures by integrating an electronic nose and tongue with radial basis function neural networks. *Food and Bioprocess Technology*, 11, 1840–1852. DOI:10.1007/s11947-018-2148-8

Srinivasan, P., Robinson, J., Geevaretnam, J., & Rayappan, J.B.B. (2020). Development of electronic nose (Shrimp-Nose) for the determination of perishable quality and shelf-life of cultured Pacific white shrimp (Litopenaeus vannamei). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 317. DOI:10.1016/j.snb.2020.128192

Taheri-Garavand, A., Fatahi, S., Banan, A., & Makino, Y. (2019). Real-time nondestructive monitoring of common carp fish freshness using robust vision-based intelligent modeling approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 159, 16–27. DOI:10.1016/j.compag.2019.02.023

Tan, C.H., Huang, Y.Q., Feng, J.H., Li, Z.S., & Cai, S.H. (2018). Freshness assessment of intact fish via 2D ^{1}H J-resolved NMR spectroscopy combined with pattern recognition methods. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 348–356. DOI:10.1016/J.SNB.2017.08.060

Tian, X.Y., Cai, Q., & Zhang, Y.M. (2012). Rapid classification of hairtail fish and pork freshness using an electronic nose based on the PCA method. *Sensors*, 12, 260–277. https://doi.org/10.3390/s120100260

Wang, R., He, H., Liu, L., Ma, H., Liu, X., Mo, H., *et al*. (2019). Recent progress in hyperspectral imaging for nondestructive evaluation of fish quality. *Food Science*, 40, 329–338. DOI: 10.1111/1541-4337.12123

Wangtueai, S., Vichasilp, C., Pankasemsuk, T., Theanjumpol, P., & Phimolsiripol, Y. (2021). Near infrared spectroscopy measurement and kinetic modeling for physiochemical properties of tabtim fish (hybrid tilapia Oreochromis sp.) fillets during chilling storage. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 11. https://doi.org/10.15414/jmbfs.1412

Wei, X., Zhang, M., Chen, K., Huang, M., Mujumdar, A.S., & Yang, C. (2024). Intelligent detection and control of quality deterioration of fresh aquatic products in the supply chain: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108720. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108720

Wu, D., & Sun, D.W. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control - a review. *Trends in Food Science & Technology*, 29, 5–20. DOI:10.1016/j.compag.2019.02.023

Zhang, L., Yu, Q., Zhang, M., Law, C.L., & Ma, Y. (2023). Intelligent detection of quality deterioration and adulteration of fresh meat products in the supply chain: research progress and application. *Food Bioscience*, 55, 103047. DOI:10.1016/j.fbio.2023.103047

Zhang, S.H., Fan, Q.Z., Guo, J.Q., Jiao, X.H., Kong, X.M., & Yu, Q. (2022). Surface-enhanced Raman spectroscopy tandem with derivatized thin-layer chromatography for ultra-sensitive on-site detection of histamine from fish. *Food Control*, 138. doi: 10.1016/j.foodcont.2022.108987

Zhou, J.J., Wu, X.Y., Chen, Z., You, J., & Xiong, S.B. (2019). Evaluation of freshness in freshwater fish based on near infrared reflectance spectroscopy and chemometrics.

ISSN : 2621 - 1475
J. Fish Protech 2026, Vol. 9 No. 2

LWT - Food Science and Technology, 106, 145–150. DOI:10.1016/j.lwt.2019.01.056

Zhu, P.Y., Zhang, Y.L., Chou, Y.X., & Gu, Y. (2019). Recognition of the storage life of mitten crab by a machine olfactory system with deep learning. *Journal of Food Process Engineering*, 42.

Zhuang, S., Hong, H., Zhang, L., & Luo, Y. (2021). Spoilage-related microbiota in fish and crustaceans during storage: research progress and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20, 252–288. DOI: 10.1111/1541-4337.12659