

Sensor Kertas Fluoresen Kurkumin/Rhodamin B untuk Pemantauan Kesegaran Daging Ayam Berbasis Analisis Citra Digital

Curcumin/Rhodamine B Fluorescent Paper Sensor for Chicken Meat Freshness Monitoring Based on Digital Image Analysis

Sandra^{1*}, Dimas Firmanda Al Riza¹, Mitha Sa'diyah¹, Rut Juniar Nainggolan¹

¹ Teknik Biosistem, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia.

Email*): sandra.msutan@ub.ac.id

Received:
30 September
2025

Revised:
23 Maret 2026

Accepted:
20 September
2026

Published:
29 September
2026

DOI:
10.29303/jrpb.v
14i2.1207

Available at:
[http://jrpb.unr
am.ac.id/](http://jrpb.unr
am.ac.id/)

Abstract: The safety of chicken meat is determined by its freshness, which is related to the formation of biogenic amines during protein degradation. Conventional methods for detecting meat spoilage are relatively expensive and complex, necessitating the development of alternative, non-destructive approaches. This study aimed to develop a fluorescent paper-based sensor using curcumin and rhodamine B for semi-quantitative monitoring of chicken meat freshness using digital image analysis. The fluorophores were immobilized on filter paper and tested against ammonia vapor (5–500 ppm) as well as headspace emissions from fresh chicken and carrion chicken during 12-hour storage. Images were captured under 365 nm UV light and analyzed using RGB ratios (R/RGB and G/RGB). Curcumin strips showed an increase in G/RGB as ammonia concentration rose, while rhodamine B exhibited a decrease in R/RGB due to fluorescence quenching, indicating complementary ratiometric responses. During storage, fresh chicken exhibited gradual changes in color ratios consistent with degradation dynamics and pH fluctuations, whereas carrion chicken remained relatively stable as it was already in an advanced stage of degradation. The relationship between fluorescence ratios and pH was not always significant, except for the G/RGB parameter in carrion chicken. This system has the potential as a non-destructive, low-cost method for distinguishing fresh and carrion chicken, although further validation is still required.

Keywords: *chicken meat; curcumin; digital image analysis; fluorescent paper sensor; rhodamine B*

Abstrak: Keamanan daging ayam ditentukan oleh tingkat kesegarannya yang berkaitan dengan pembentukan amina biogenik selama degradasi protein. Metode konvensional untuk mendeteksi kerusakan daging relatif mahal dan kompleks, sehingga diperlukan pendekatan alternatif yang non-destruktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sensor kertas berbasis fluoresen yang menggunakan kurkumin dan rhodamine B untuk pemantauan semi-kuantitatif kesegaran daging ayam dengan menggunakan analisis citra digital. Fluorofor diimobilisasi pada kertas saring dan diuji terhadap uap amonia (5–500 ppm) serta emisi headspace dari ayam segar dan ayam tiren selama penyimpanan 12 jam. Citra diambil di bawah UV 365 nm dan dianalisis menggunakan rasio RGB (R/RGB dan G/RGB). Strip kurkumin menunjukkan peningkatan G/RGB seiring kenaikan konsentrasi amonia, sedangkan rhodamine B mengalami penurunan R/RGB akibat *fluorescence quenching*, menunjukkan respon ratiometrik komplementer. Selama penyimpanan, ayam segar memperlihatkan perubahan bertahap pada rasio warna yang sejalan dengan dinamika degradasi dan fluktuasi pH, sedangkan ayam tiren relatif stabil karena telah berada pada tahap degradasi lanjut. Hubungan antara rasio fluoresensi dan pH tidak selalu signifikan, kecuali pada parameter G/RGB untuk ayam tiren. Sistem ini berpotensi sebagai metode deteksi non-destruktif dan berbiaya rendah untuk membedakan ayam segar dan tiren, meskipun validasi lanjutan masih diperlukan.

Kata kunci: analisis citra digital; daging ayam; kurkumin; rhodamin B; sensor kertas fluoresen

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Daging ayam merupakan salah satu sumber protein hewani yang gemar dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Daging ayam banyak dikonsumsi karena mudah diperoleh di pasaran, mudah diolah, memiliki harga yang relatif terjangkau, serta mengandung zat gizi yang tinggi (Yıldız & Arslan Duru, 2019). Daging ayam rentan dengan kontaminasi mikroba seperti bakteri *Salmonella* dan *Campylobacter* yang tumbuh karena kondisi penyimpanan yang tidak sesuai akan menyebabkan penurunan mutu daging (Heir et al., 2022). Penjualan ayam tiren (ayam mati sebelum disembelih) masih sering ditemukan di pasar tradisional. Fenomena ini dipicu oleh harga jualnya yang lebih murah dan karakteristik visualnya yang sulit dibedakan dari daging ayam segar. Namun, peredaran ayam tiren berpotensi membahayakan kesehatan konsumen karena kematian ayam dapat disebabkan oleh penyakit zoonosis, seperti *avian influenza* (Yanestria & Wibisono, 2017). Bahaya lain selain penyakit zoonosis yaitu kemungkinan keracunan akibat pengeluaran darah yang tertahan dari ayam tiren sendiri dapat menjadi media perkembangan bakteri (Koriyati et al., 2019). Ayam tiren mengandung bakteri yang dapat menginfeksi saluran pencernaan seperti diare, sakit perut, mual dan muntah. Dengan berbagai ancaman kesehatan tersebut, peredaran ayam tiren ini dinilai sangat merugikan. Peredaran ayam tiren tentunya melanggar Undang-Undang No. 18 Tahun 2012 yang berisikan aturan keamanan pangan, bermutu dan layak konsumsi. Selain itu penjualan ayam tiren juga melanggar undang-undang No. 8 Tahun 1999 berisi tentang perlindungan konsumen. Ayam tiren sendiri merupakan bangkai hewan sehingga tidak layak dikonsumsi manusia serta mengedarkan produk yang berbahaya.

Pengembangan metode untuk mengukur kesegaran daging ayam terus mengalami evolusi. Metode konvensional seperti analisis kimia untuk mendeteksi indikator kebusukan, termasuk amina biogenik (senyawa hasil dekarboksilasi asam amino oleh bakteri), mulai tergantikan. Demikian pula analisis mikrobiologi melalui *Total Viable Count* (TVC) yang mengukur jumlah bakteri serta perubahan pH (Dourou et al., 2021). Pada perkembangannya, metode tersebut banyak dialihkan kepada penerapan biosensor yang menawarkan efisiensi biaya, kecepatan, dan akurasi yang lebih tinggi (Vanegas et al., 2018). Berbagai pendekatan sensor telah dikembangkan untuk mendeteksi kesegaran daging melalui senyawa volatil seperti amonia dan amina biogenik yang dihasilkan selama proses degradasi protein. Beberapa penelitian melaporkan penggunaan indikator warna maupun material fluoresen sebagai sensor sederhana untuk memantau perubahan kimia pada produk daging (Alizadeh-Sani et al., 2021; Huang et al., 2025; Zhang et al., 2024a). Kurkumin dikenal memiliki sensitivitas terhadap senyawa basa yang dapat menyebabkan perubahan warna atau intensitas fluoresensi (Chen et al., 2025). Sedangkan rhodamin B merupakan fluorofor yang responsif terhadap perubahan lingkungan kimia melalui fenomena *fluorescence quenching* (Li et al., 2022). Kedua senyawa ini berpotensi digunakan sebagai indikator untuk mendeteksi keberadaan uap amonia yang berkaitan dengan tingkat kesegaran daging.

Inovasi terbaru difokuskan pada pengembangan sensor berbasis kertas, yang menjanjikan deteksi yang cepat, praktis, sensitif, portabel, serta berbiaya rendah. Dalam konteks ini, kurkumin dan rhodamin B umumnya digunakan sebagai indikator fluoresen. Kurkumin (*diferuloylmethane*) merupakan senyawa polifenolik dengan struktur β -diketon yang berada dalam kesetimbangan keto-enol dan sangat sensitif terhadap perubahan pH; pada kondisi basa akibat paparan amonia (NH_3), terjadi proses deprotonasi gugus fenolik dan enolat yang meningkatkan delokalisasi elektron π sepanjang sistem konjugasi, sehingga memperkuat transisi $\pi \rightarrow \pi^*$ dan menghasilkan peningkatan intensitas fluoresensi hijau (sekitar 500–550 nm) (Choi et al., 2024; Gangemi et al., 2025). Fenomena ini telah dikonfirmasi pada berbagai platform kemasan cerdas berbasis kurkumin untuk monitoring pembusukan

protein, di mana peningkatan pH akibat deaminasi mikroba memicu perubahan spektral yang signifikan. Kurkumin berfungsi sebagai sensor yang mampu merespon perubahan pH selama proses pembusukan melalui perubahan warna (Lin et al., 2024; Tan et al., 2019).

Sementara itu, rhodamine B sebagai fluorofor kationik turunan xanthene, cenderung mengalami *fluorescence quenching* melalui interaksi dengan amina volatil, baik melalui mekanisme Photoinduced Electron Transfer (PET) maupun pembentukan kompleks non-emissive yang menurunkan probabilitas emisi radiatif pada panjang gelombang merah ($\approx 580\text{--}610\text{ nm}$); proses ini menyebabkan penurunan intensitas fluoresensi merah yang proporsional terhadap konsentrasi amonia. Rhodamin B memanfaatkan sifat fluoresensinya untuk mendeteksi kebusukan dengan memancarkan cahaya ketika diberi stimulasi sinar UV (Petropoulou et al., 2020; Savarese et al., 2014).

Sebagian besar penelitian sebelumnya juga hanya berfokus pada deteksi kerusakan umum, tanpa membedakan antara ayam segar dan ayam tiren yang memiliki profil biokimia berbeda, serta jarang divalidasi dengan parameter objektif seperti pH. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian yang perlu dijawab melalui pendekatan yang lebih akurat, sensitif, dan andal. Dengan demikian, diperlukan biosensor ratiometrik yang mampu membedakan ayam segar dan ayam tiren secara cepat, akurat, dan non-destruktif.

Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan memfabrikasi sensor kertas fluoresen berbasis kurkumin dan rhodamin B yang mampu memberikan respon optik terhadap senyawa volatil amonia (NH_3) yang dilepaskan selama proses pembusukan daging ayam. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menguji performa biosensor melalui analisis citra warna berbasis nilai *Red*, *Green*, *Blue* (RGB), sehingga dapat diperoleh indikator semi-kuantitatif yang merepresentasikan perubahan mutu daging selama penyimpanan.

METODE PENELITIAN

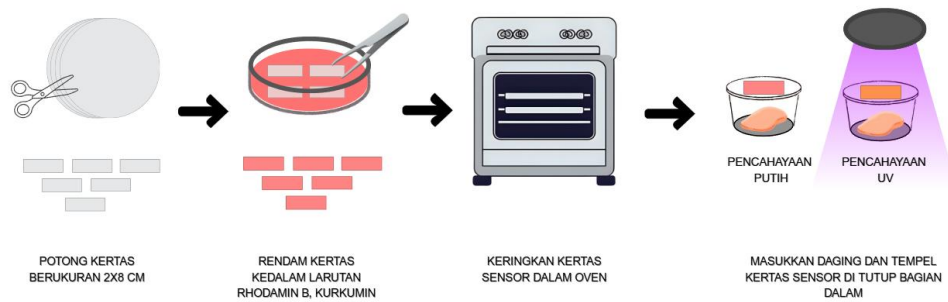
Alat dan Bahan

Sampel ayam diperoleh dari ayam yang baru disembelih di peternakan lokal di Malang, Jawa Timur. Sedangkan ayam tiren didapatkan dari peternakan ayam broiler di Kota Batu, Jawa Timur. Bahan yang digunakan untuk sensor adalah kurkumin dan rhodamin B. Untuk pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium *Center of Excellence* (COE) Bio-Ai dan Laboratorium Daya dan Mesin Pertanian, Departemen Teknik Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang. Penelitian dilaksanakan mulai bulan Agustus hingga September 2025.

Metode

Persiapan Sensor

Sensor berbasis kertas kurkumin dan rhodamin B dipersiapkan menggunakan kertas saring whatman No. 1 yang dipotong berbentuk persegi panjang dengan ukuran $8 \times 2\text{ cm}$. Pembuatan sensor dimulai dengan menyiapkan larutan kurkumin dan rhodamin B. kurkumin $10\text{ mg}/100\text{ mL}$ etanol dan rhodamin B $10\text{ mg}/100\text{ mL}$ etanol. Selanjutnya, sensor kertas direndam secara terpisah dalam larutan kurkumin atau rhodamin B selama 10 menit, kemudian diangkat dan ditiriskan. Sensor dikeringkan dalam oven pada suhu $40\text{ }^\circ\text{C}$ selama 30 menit. Adapun persiapan pembuatan sensor dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Preparasi sensor kertas berbasis rhodamin B dan kurkumin

Uji Sensitivitas Sensor terhadap Amonia (NH₃)

Evaluasi karakter respons sensor fluoresen berbasis kurkumin dan rhodamin B terhadap senyawa volatil basa, dilakukan pengujian menggunakan uap NH₃ sebagai model senyawa representatif hasil degradasi protein daging. Amonia dipilih karena merupakan produk volatil utama selama proses pembusukan dan sering digunakan sebagai indikator kimia perubahan kesegaran daging. Pengujian dilakukan secara semi-kuantitatif berbasis paparan *headspace*, dengan mengevaluasi perubahan sinyal optik sensor pada beberapa tingkat konsentrasi NH₃ (5, 25, 50, 250, dan 500 ppm). Pendekatan ini tidak dimaksudkan untuk menghasilkan kurva kalibrasi analitik presisi, melainkan untuk mengamati pola respons konsentrasi-responsif serta kemampuan diskriminatif sensor terhadap peningkatan kadar NH₃.

Konsentrasi NH₃ dalam *headspace* dihitung berdasarkan hubungan stoikiometri antara volume larutan yang diinjeksi dan volume wadah tertutup (100 mL), dihitung menggunakan Persamaan (1) (Wang et al., 2025a)

$$C_{ppm} = \frac{V_{in} \times D \times W}{M \times V_h} \times 22.4 \times 10^{-9} \dots \dots \dots (1)$$

di mana V_{in} adalah volume larutan yang diinjeksi (μ L), D adalah densitas larutan (mg/L), W adalah fraksi kemurnian, M adalah berat molekul amonia (g/mol), dan V_h adalah volume headspace (L). Faktor 22,4 merepresentasikan volume molar gas pada kondisi standar. Sensor ditempatkan pada bagian dalam tutup wadah sehingga terpapar langsung terhadap atmosfer uap NH₃ tanpa kontak cair langsung. Setelah waktu inkubasi tertentu, respon sensor direkam menggunakan pencitraan digital terkendali.

Analisis dilakukan menggunakan pendekatan ratiometrik berbasis citra RGB, dengan menghitung fraksi kromatik (R/RGB dan G/RGB) sebagai parameter semi-kuantitatif untuk mengevaluasi perubahan optik akibat paparan NH₃. Parameter ini digunakan untuk mengidentifikasi pola perubahan sinyal dan kemampuan sistem dalam membedakan tingkat paparan amina volatil.

Uji Sensor terhadap Emisi Volatile dari Daging

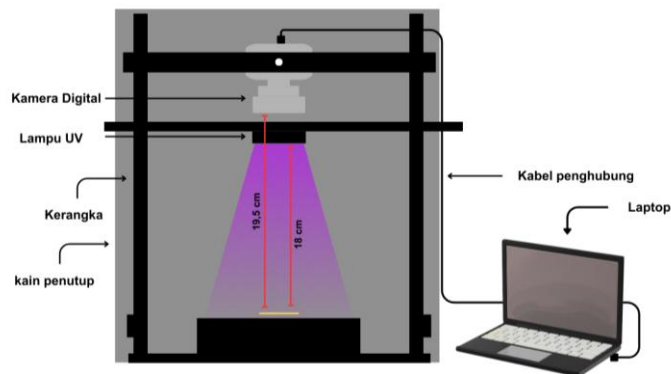
Pengujian sensor terhadap emisi volatil daging dilakukan dengan menggunakan dua tipe daging ayam, yaitu daging ayam segar dan daging ayam tiren. Bagian daging yang digunakan adalah daging dada dengan massa masing-masing sampel sebesar 10 g. Untuk pengamatan emisi volatile daging ayam dilakukan pada interval waktu 0, 4, 8, dan 12 jam. Daging ayam disimpan dalam cup 100 mL yang telah ditambahkan sensor kurkumin dan rhodamin B yang ditempel pada bagian dalam tutup cup. Analisis respon sensor dilakukan berdasarkan perubahan warna sensor yang ditangkap melalui komponen warna RGB.

Perubahan nilai RGB digunakan sebagai indikator semi-kuantitatif untuk menilai proses pembusukan yang terjadi.

Akuisisi Data dan Pengolahan Data

Data yang diakuisisi berupa citra fluoresensi sensor dan sampel daging yang diperoleh menggunakan sistem pencitraan berbasis kamera digital. Pengambilan citra dilakukan di dalam mini studio tertutup berlatar belakang hitam untuk menghilangkan interferensi cahaya sekitar. Sumber eksitasi ultraviolet (UV) menggunakan lampu UV LDR2-100UV3-365-N (eksitasi 365 nm), sedangkan perekaman citra dilakukan dengan kamera Canon EOS 700D sesuai skema sistem komputer visi pada **Gambar 2**. Untuk menjamin konsistensi geometris dan optik, posisi kamera dan sumber UV dipertahankan pada jarak tetap terhadap sampel selama seluruh percobaan. Kamera dioperasikan dalam mode manual penuh dengan pengaturan tetap ISO 100, aperture f/1.3, dan kecepatan rana 0,3 detik guna mencegah penyesuaian eksposur otomatis. Koreksi white balance tidak diterapkan karena eksitasi dilakukan pada panjang gelombang UV, sehingga kompensasi suhu warna tidak relevan dan berpotensi mendistorsi sinyal emisi fluoresensi (Chen & Wei, 2018). Seluruh citra disimpan dalam format .JPG untuk analisis lebih lanjut.

Untuk meningkatkan reliabilitas kuantifikasi, analisis warna dilakukan menggunakan pendekatan normalisasi ratiometrik (R/RGB dan G/RGB) sebagai pengganti intensitas RGB absolut, sehingga dapat meminimalkan variasi akibat fluktuasi kecil intensitas pencahayaan atau perubahan global kecerahan citra. Setiap pengukuran dilakukan dalam tiga ulangan guna meningkatkan reproduktibilitas data. Seluruh citra kemudian diproses melalui tahap *preprocessing* yang meliputi penghilangan latar belakang (*background removal*) dan pengurangan gangguan (*noise reduction*) sebelum dilakukan ekstraksi fitur berbasis model warna RGB untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi sinyal fluoresensi secara lebih akurat. Proses akuisisi dan pengolahan citra diimplementasikan menggunakan pemrograman Python, memungkinkan integrasi metode pengolahan citra secara sistematis, terstandar, dan reproduksibel.



Gambar 2. Skema sistem akuisisi citra menggunakan kamera digital dan pencahayaan UV

Uji pH Daging

Pengukuran pH dilakukan untuk menilai perubahan kualitas daging ayam segar dan ayam tiren selama penyimpanan. Sampel daging ayam disimpan pada kondisi ruang dan diukur nilai pH-nya pada interval waktu 0, 4, 8, dan 12 jam. Pengukuran pH dilakukan menggunakan pH meter portable yang dilengkapi dengan aplikasi *Yinmik* untuk pencatatan data secara *real-time*. Pengambilan sampel menggunakan pH meter yang terlebih dahulu dikalibrasi sebelum digunakan pada setiap sesi pengukuran mengikuti standar prosedur pabrik (AOAC, 2019) untuk menjamin validitas data (Allan et al., 2017).

Metode ini dipilih karena analisis pH untuk mencerminkan aktivitas biokimia *pasca-mortem* serta potensi kontaminasi mikroba. Penggunaan pH meter portable dinilai efektif karena mampu memberikan hasil yang cepat, akurat, serta dapat diaplikasikan secara langsung pada jaringan daging tanpa persiapan sampel yang kompleks (C. Liu et al., 2022; Shen et al., 2025). Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah nilai pH daging ayam pada setiap interval waktu penyimpanan. Proses pengambilan data dilakukan dengan menempelkan dan sedikit menusukkan elektroda pH meter ke dalam jaringan daging untuk memperoleh hasil yang representatif. Setiap pengukuran dilakukan dalam 15 detik hingga nilai pH stabil untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih akurat serta mengurangi potensi bias.

Analisis Statistik

Parameter warna RGB dari citra digital dianalisis secara statistik untuk mengevaluasi respon sensor kertas fluoresen terhadap paparan senyawa volatil. Seluruh pengukuran dilakukan dalam tiga ulangan ($n = 3$) pada setiap waktu sampling, dan data disajikan sebagai rata-rata $\pm$ simpangan baku (SD). Perbedaan respon antar waktu penyimpanan dianalisis menggunakan ANOVA satu arah. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan, tren rasio warna (R/RGB dan G/RGB) diinterpretasikan lebih lanjut. Analisis korelasi dan regresi linier dilakukan untuk mengevaluasi kecenderungan hubungan antara rasio warna dan nilai pH sampel ayam. Seluruh analisis dilakukan pada tingkat signifikansi 95% ($p < 0,05$). Analisis regresi dalam penelitian ini dimaksudkan untuk mengevaluasi kecenderungan hubungan secara semi-kuantitatif, bukan untuk membangun model prediktif kuantitatif presisi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

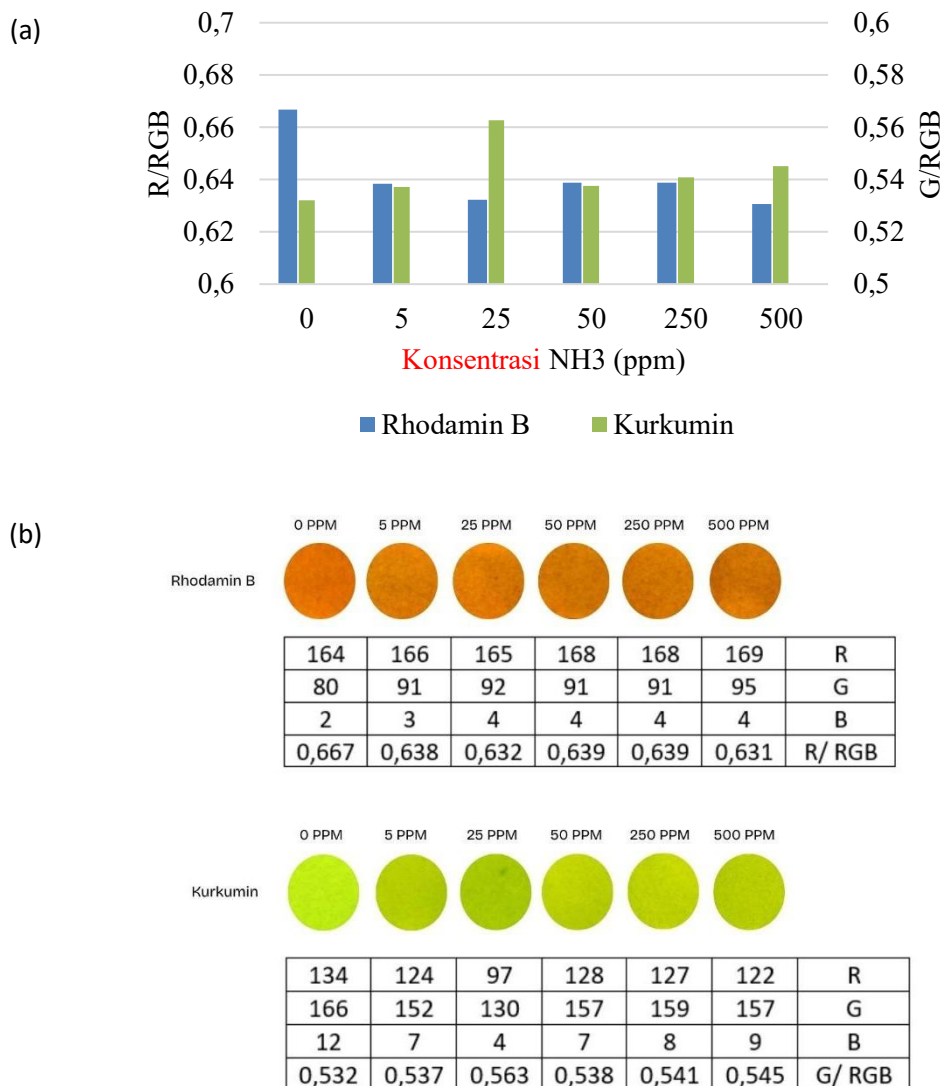
Respon Sensor terhadap Variasi Konsentrasi Uap NH_3

Hasil analisis semi-kuantitatif dan visual menunjukkan bahwa sensor kertas fluoresen memberikan respon diferensial yang konsisten terhadap paparan NH_3 . Secara visual (**Gambar 3b**), sensor kertas kurkumin memperlihatkan peningkatan intensitas hijau, sedangkan sensor kertas rhodamin B mengalami pemudaran warna merah seiring kenaikan konsentrasi NH_3 dari 0 hingga 500 ppm. Hal ini diperkuat oleh analisis semi-kuantitatif (**Gambar 3a**) yang mencatat penurunan nilai fraksi kromatik merah (R/RGB) pada rhodamin B dari 0,667 menjadi 0,631, serta peningkatan fraksi hijau (G/RGB) pada kurkumin dari 0,532 menjadi 0,545. Pendekatan ratiometrik berbasis citra RGB terbukti efektif untuk mengevaluasi interaksi fluoresensi dengan amina volatil (Z. Liu et al., 2025). Pergeseran optik yang saling berlawanan ini menegaskan sensitivitas selektif sistem sensor terhadap senyawa volatil basa, dengan rhodamin B menunjukkan sensitivitas tinggi dalam mendeteksi amonia volatil (Wang et al., 2025b).

Respon komplementer tersebut mencerminkan mekanisme molekuler yang berbeda. Penurunan intensitas fluoresensi rhodamin B disebabkan oleh fenomena *fluorescence quenching* akibat interaksi dengan molekul amina, sedangkan peningkatan intensitas fluoresensi kurkumin konsisten dengan mekanisme deprotonasi yang meningkatkan efisiensi emisi fluorofor pada lingkungan basa. Temuan ini tidak hanya menegaskan keandalan sistem sensor yang dikembangkan, tetapi juga memberikan dasar mekanistik yang kuat bagi pengembangannya sebagai indikator visual semi-kuantitatif untuk mendeteksi senyawa volatil basa dalam pemantauan kesegaran produk pangan (Lu et al., 2023).

Lebih lanjut, pola hubungan yang tidak linier antara rasio fluoresensi dan konsentrasi NH_3 yang diamati dalam penelitian ini mengindikasikan bahwa respon sistem tidak semata-mata mengikuti kinetika linear sederhana, melainkan dipengaruhi oleh dinamika molekuler yang lebih kompleks. Pada konsentrasi NH_3 rendah hingga sedang, peningkatan pH akibat deprotonasi kurkumin memperkuat delokalisasi elektron dan meningkatkan intensitas emisi,

sehingga rasio fluoresensi berubah secara progresif; namun pada konsentrasi yang lebih tinggi, kemungkinan terjadi kejenuhan sebagian situs aktif (*partial saturation*) serta mekanisme *fluorescence quenching* dinamis maupun statis yang menurunkan efisiensi emisi radiative (Daly et al., 2015). Dalam kondisi tersebut, interaksi molekul amonia dengan fluorofofor dapat memicu proses *photoinduced electron transfer* (PET) atau pembentukan kompleks *non-emissive* yang menyebabkan deviasi dari linearitas ideal. Fenomena non-linier semacam ini umum dilaporkan pada sensor fluoresen ratiometrik berbasis polifenol dan xanthene, terutama ketika sistem mendekati batas deteksi dinamisnya atau mengalami perubahan mikro-lingkungan matriks yang mempengaruhi *quantum yield* (Niu et al., 2023).



Gambar 3. Respon visual strip kurkumin dan rhodamin B terhadap uap NH₃ (0–500 ppm) di bawah UV (ex.365 nm). a) grafik respon sensor terhadap NH₃, dan (b) citra sensor kertas fluoresen dengan data numerik terhadap uap NH₃ (0–500 ppm).

Perlu ditegaskan bahwa sistem sensor ini dirancang untuk deteksi ambang batas kerusakan, bukan untuk pengukuran semi-kuantitatif presisi pada konsentrasi rendah. Respon sensor menunjukkan stabilitas dan perbedaan signifikan pada konsentrasi amonia di atas 50 ppm, yang merepresentasikan kondisi degradasi protein lanjut. Rentang operasional ini sesuai dengan tujuan kemasan cerdas yang memprioritaskan diskriminasi visual cepat.

Dengan demikian, ketidaklinieran pada konsentrasi rendah tidak mengganggu aplikasi yang dimaksud. Non-linearitas tersebut justru mencerminkan desain fungsional sistem untuk pemantauan kualitas berbasis ambang batas. Pendekatan ini sejalan dengan perkembangan terkini dalam penelitian sensor kesegaran pangan berbasis optik dan kertas, di mana amonia digunakan sebagai analit model karena interaksinya yang kuat dengan fluorofor sensitif pH serta hubungannya dengan pembentukan *Total Volatile Basic Nitrogen* (TVB-N). Meskipun demikian, pendekatan ini tetap dikategorikan sebagai validasi semi-kuantitatif, bukan kalibrasi analitis penuh, mengingat kompleksitas campuran senyawa volatil dalam sistem pangan nyata tidak dapat sepenuhnya direpresentasikan oleh satu senyawa standar.

Respon Sensor terhadap Emisi Volatil Daging Ayam

Untuk mendeteksi dan mengevaluasi perubahan intensitas fluoresensi, penelitian ini menggunakan analisis warna berbasis kamera yang menangkap nilai RGB pada permukaan sensor. Perubahan respon sensor rhodamin B terhadap emisi volatil dari daging ayam selama penyimpanan disajikan pada **Tabel 1**. Pada sampel ayam segar, citra fluoresensi menunjukkan perubahan warna yang berlangsung secara bertahap selama periode penyimpanan 0–12 jam. Secara semi-kuantitatif, perubahan komposisi kanal warna tercermin dari penurunan rasio R/RGB dari 0,62 menjadi 0,60. Sebaliknya, pada sampel ayam tiren, variasi rasio R/RGB relatif lebih kecil, menunjukkan respon yang cenderung stabil selama periode pengamatan. Stabilitas respon sensor pada kondisi ini mengindikasikan bahwa ayam tiren kemungkinan telah mengalami degradasi yang lebih lanjut sebelum pengamatan dilakukan, sehingga konsentrasi senyawa volatil berada pada tingkat yang relatif tinggi sejak awal pengukuran. Dengan demikian, sistem sensor menunjukkan respon yang lebih terbatas karena lingkungan kimia di sekitar sensor telah mendekati kondisi jenuh terhadap senyawa volatil basa (Bekhit et al., 2021).

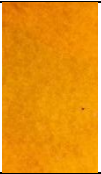
Fenomena tersebut berkaitan dengan terjadinya *fluorescence quenching* pada rhodamin B akibat interaksi dengan senyawa volatil basa, terutama NH_3 , yang dihasilkan selama proses degradasi protein pada daging (Zhai et al., 2024). Akumulasi senyawa volatil ini merupakan hasil dari aktivitas mikrobiologis dan enzimatis yang menyebabkan deaminasi asam amino serta pembentukan amina biogenik selama penyimpanan (Bekhit et al., 2021). Pergeseran warna ini mengindikasikan respon sensor terhadap akumulasi senyawa volatil basa, terutama amonia dan biogenik amina yang dilepaskan akibat degradasi protein oleh aktivitas mikroba (Z. Liu et al., 2025; Wang et al., 2025b).

Perubahan respon sensor kurkumin terhadap emisi volatil dari daging ayam selama penyimpanan ditunjukkan pada **Tabel 2**. Citra fluoresensi memperlihatkan bahwa warna hijau kekuningan yang dihasilkan oleh kurkumin relatif stabil selama periode penyimpanan 0–12 jam, baik pada ayam segar maupun ayam tiren. Namun, analisis semi-kuantitatif terhadap parameter warna RGB menunjukkan adanya variasi intensitas yang dapat diamati melalui perubahan rasio warna G/RGB. Pada sampel daging ayam segar, perubahan komposisi warna menghasilkan rasio G/RGB yang relatif stabil namun menunjukkan fluktuasi kecil pada kisaran 0.52–0.53 dengan deviasi standar rendah (± 0.002 – 0.004). Variasi kecil ini mengindikasikan bahwa sensor kurkumin memiliki respon fluoresensi yang cukup stabil terhadap perubahan lingkungan kimia selama tahap awal penyimpanan daging (J. Liu et al., 2018).

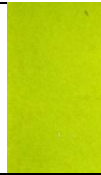
Pada sampel ayam tiren, nilai komponen RGB menunjukkan pola yang sedikit berbeda. Nilai R mengalami peningkatan pada akhir pengamatan, sedangkan komponen G berfluktuasi. Komponen biru relatif stabil pada kisaran 11.11–12.86. Meskipun terdapat perubahan pada intensitas masing-masing kanal warna, rasio G/RGB tetap berada pada kisaran sempit sekitar 0.52–0.53 dengan deviasi standar yang sangat kecil (± 0.001 – 0.004). Stabilitas rasio ini menunjukkan bahwa kondisi kimia pada ayam tiren telah berada pada

tahap degradasi yang lebih lanjut sehingga perubahan konsentrasi senyawa volatil selama periode pengamatan relatif kecil. Pola perubahan ini mencerminkan dinamika pembusukan yang lebih aktif dibandingkan daging busuk lanjut, di mana perubahan warna sejak awal sudah mendekati titik jenuh (Lu et al., 2023; Zhang et al., 2024b).

Tabel 1. Perubahan nilai warna RGB dan rasio R/RGB pada sensor kertas fluoresen rhodamin B selama penyimpanan daging ayam segar dan ayam tiren (0-12 jam)

	Ayam segar				Ayam tiren			
	0	4	8	12	0	4	8	12
Citra fluoresensi								
Nilai R	252.12	236.66	235.16	196.83	233.97	231.76	241.35	235.78
Nilai G	149.38	142.07	141.19	112.66	121.54	142.34	146.37	144.79
Nilai B	1.21	3.70	6.43	13.51	3.07	4.14	3.97	4.67
R/RGB	0.62 ± 0.017	0.61 ± 0.001	0.61 ± 0.012	0.60 ± 0.002	0.65 ± 0.01	0.61 ± 0.002	0.61 ± 0.006	0.61 ± 0.004

Tabel 2. Perubahan nilai warna RGB dan rasio R/RGB pada sensor kertas fluoresen kurkumin selama penyimpanan daging ayam segar dan ayam tiren (0-12 jam)

	Ayam segar				Ayam tiren			
	0	4	8	12	0	4	8	12
Citra fluoresensi								
Nilai R	199.05	186.85	197.01	190.28	189.83	195.54	193.39	203.02
Nilai G	241.89	219.02	221.16	212.34	225.86	227.89	226.98	232.07
Nilai B	22.68	8.85	7.97	6.87	11.11	12.69	12.86	12.05
G/RGB	0.52 ± 0.002	0.53 ± 0.002	0.52 ± 0.003	0.52 ± 0.004	0.53 ± 0.002	0.522 ± 0.004	0.52 ± 0.003	0.52 ± 0.001

Secara kimiawi, respon kurkumin terhadap senyawa volatil basa seperti amonia berkaitan dengan sifat pH-sensitive fluorophore dari molekul tersebut. Kurkumin memiliki gugus fenolik dan β -diketone yang dapat mengalami perubahan struktur tautomerik ketika berada pada lingkungan basa, yang kemudian mempengaruhi karakteristik absorpsi dan fluoresensinya (Kossyvakaki et al., 2022). Interaksi dengan NH_3 atau amina volatil dapat mengubah distribusi elektron dalam molekul kurkumin sehingga memodifikasi intensitas emisi fluoresensi pada kanal warna tertentu (Iandola et al., 2017; J. Liu et al., 2018).

Analisis warna berbasis kamera pada dasarnya masih rentan terhadap variasi lingkungan, termasuk fluktuasi intensitas pencahayaan, respons spektral sensor kamera, serta perubahan geometri antara sumber cahaya, sampel, dan detektor, yang secara kolektif dapat mempengaruhi akurasi nilai RGB yang diperoleh. Dalam penelitian ini, potensi gangguan tersebut diminimalkan melalui penggunaan mini studio tertutup, pengaturan kamera dalam mode manual penuh dengan parameter tetap, serta penempatan sumber eksitasi dan kamera pada jarak konstan. Selain itu, pendekatan normalisasi ratiometrik (R/RGB dan G/RGB)

diterapkan untuk mengurangi pengaruh variasi intensitas absolut, karena rasio antar kanal warna relatif lebih stabil terhadap perubahan kecerahan global dibandingkan nilai RGB mentah. Meskipun demikian, metode pencitraan berbasis kamera tetap dikategorikan sebagai pendekatan semi-kuantitatif, mengingat hasil pengukuran masih bergantung pada sistem optik dan karakteristik perangkat yang digunakan.

Dibandingkan dengan sistem pencitraan digital, instrumen terkalibrasi seperti kolorimeter atau spektrofotometer reflektansi/fluoresensi menawarkan akurasi, presisi, dan reproduktibilitas yang lebih tinggi karena menggunakan sumber cahaya terstandar serta detektor dengan respons spektral yang terkalibrasi. Oleh karena itu, meskipun pendekatan berbasis kamera dalam penelitian ini dirancang untuk mendukung pengembangan sensor yang portabel dan berbiaya rendah, integrasi validasi silang menggunakan instrumen referensi direkomendasikan pada penelitian lanjutan guna meningkatkan reliabilitas hasil semi-kuantitatif serta memperkuat ketahanan sistem terhadap variasi lingkungan. Pendekatan tersebut berpotensi memperluas aplikasi sensor dari sistem deteksi semi-kuantitatif menuju platform analitik yang lebih terstandarisasi.

Verifikasi Akurasi Sensor terhadap Deteksi Daging Ayam.

Nilai pH merupakan parameter penting dalam menentukan tingkat kesegaran daging. Menurut (Kim et al., 2022), nilai pH sekitar 6,2-6,5 menandakan dimulainya kerusakan pada daging dada ayam. **Gambar 4** menyajikan hubungan antara rasio G/RGB pada sensor kurkumin dan nilai pH pada daging ayam segar selama 12 jam penyimpanan. Terlihat bahwa rasio G/RGB mengalami peningkatan hingga jam ke-8, kemudian menurun pada jam ke-12. Hal ini mengindikasikan adanya dinamika kompleks dalam proses degradasi biokimia daging selama penyimpanan. Secara umum pH daging tidak selalu berubah linier, beberapa studi menunjukkan fase turun-naik-stabil atau fluktuatif, tergantung komposisi mikroba, kemasan, dan suhu (Hwang et al., 2022; Luong et al., 2022). Peningkatan pH pada daging dikaitkan dengan akumulasi senyawa volatil basa seperti NH_3 dan amina biogenik yang dihasilkan dari deaminasi asam amino oleh aktivitas mikroba (Odeyemi et al., 2020). Namun, pada tahap tertentu, proses metabolisme mikroorganisme tidak hanya menghasilkan senyawa basa, tetapi juga dapat menghasilkan metabolit bersifat asam, seperti asam organik (misalnya asam asetat dan asam laktat), yang berkontribusi terhadap penurunan pH secara sementara (Luong et al., 2022). Pola ini konsisten dengan temuan pada platform berbasis kertas ratiometrik yang terintegrasi dengan ponsel cerdas, di mana kanal RGB digunakan untuk mengkuantifikasi amina volatil atau TVB-N (Lin et al., 2024; Lu et al., 2023; Wang et al., 2025b).

Berbeda dengan ayam segar, **Gambar 5** menunjukkan bahwa rasio G/RGB pada sensor kurkumin untuk sampel ayam tiren cenderung stabil dengan variasi minimal seiring waktu penyimpanan, sejalan dengan nilai pH yang relatif konstan pada rentang 5,9–6,0. Stabilitas respon ini mengindikasikan bahwa proses degradasi telah berlangsung lanjut sejak awal pengukuran, sehingga laju pelepasan amina volatil tidak lagi meningkat secara signifikan dan perubahan warna sensor mencapai kondisi jenuh (*plateau*). Pola datar pada sampel dengan kualitas awal yang buruk juga dilaporkan dalam berbagai studi menggunakan sensor ratiometrik maupun *array* fluoresen, di mana respon cepat menuju kejenuhan terjadi ketika beban mikroba dan substrat reaktif telah tinggi sejak awal pengamatan (Lin et al., 2024; Zhang et al., 2024b).

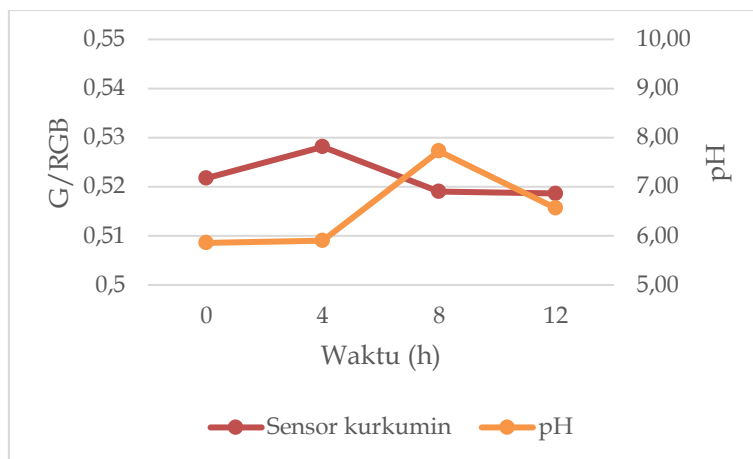
Gambar 6, menyajikan perubahan nilai rasio warna R/RGB pada sensor rhodamin B dan pH pada ayam segar selama 12 jam penyimpanan. Nilai R/RGB menunjukkan tren menurun seiring bertambahnya waktu penyimpanan. Sementara itu, nilai pH mengalami fluktuasi pada jam ke-12, di mana terjadi penurunan yang tidak sesuai dengan pola umum

peningkatan pH selama proses pembusukan. Penurunan pH sementara kemungkinan disebabkan oleh dinamika metabolisme mikroorganisme yang, selain menghasilkan senyawa basa seperti amonia dan amina biogenik, juga memproduksi asam organik seperti asam laktat dan asam asetat. Produksi asam ini dapat menurunkan pH secara transien sebelum kembali meningkat akibat dominasi reaksi deaminasi dan pembentukan senyawa basa volatil pada tahap pembusukan selanjutnya (Hwang et al., 2022; Pothakos et al., 2015). Fluktuasi tersebut mencerminkan kompleksitas proses biokimia selama penyimpanan, sehingga perubahan pH tidak selalu berlangsung secara linier. Sebaliknya, **Gambar 7** memperlihatkan perubahan nilai R/RGB pada sensor rhodamin B serta pH daging ayam tiren selama 12 jam penyimpanan. Terlihat bahwa nilai R/RGB relatif stabil di kisaran 0,58–0,59, sedangkan nilai pH mengalami fluktuasi kecil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa daging ayam tiren telah memasuki fase pembusukan lanjut sejak awal pengukuran, sehingga tidak lagi menunjukkan peningkatan pH yang signifikan. Sejalan dengan itu, respon sensor rhodamin B juga relatif konstan.

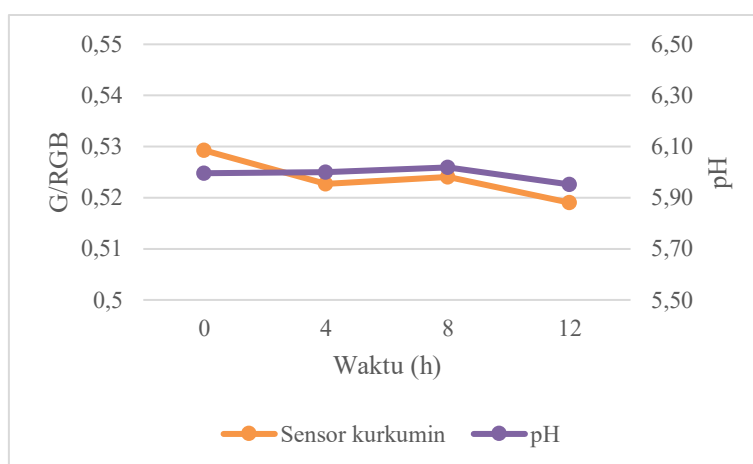
Hasil analisis regresi linier digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara rasio warna fluoresensi dan perubahan pH pada daging ayam. Pada sampel ayam segar, parameter G/RGB (sensor kurkumin) menjelaskan 42,6% variabilitas pH ($R^2 = 0,426$), sementara parameter R/RGB (sensor rhodamin B) hanya memberikan kontribusi sangat kecil ($R^2 = 0,012$). Namun, uji ANOVA terhadap model regresi menunjukkan bahwa kedua hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik (masing-masing $p = 0,129$ dan $p = 0,957$), mengindikasikan bahwa respon fluoresensi pada sampel segar tidak memiliki ketergantungan linier yang kuat terhadap pH dalam rentang yang diamati.

Sebaliknya, pada daging ayam tiren, analisis regresi menunjukkan hubungan linier hampir sempurna antara rasio G/RGB dan pH ($R^2 = 0,9999$), dengan uji ANOVA mengonfirmasi signifikansi statistik model ini ($p = 0,024$). Hal ini menunjukkan bahwa variasi pada kanal fluoresensi hijau (sensor kurkumin) sangat berkorelasi dengan perubahan pH pada sampel tiren. Meskipun rasio R/RGB pada sampel tiren juga menunjukkan koefisien determinasi yang sangat tinggi ($R^2 = 0,990$), model regresi tersebut tidak signifikan secara statistik ($p = 0,080$). Dengan demikian, di antara parameter yang dievaluasi, sensor kurkumin terbukti menjadi indikator paling handal untuk memantau variasi pH pada ayam tiren.

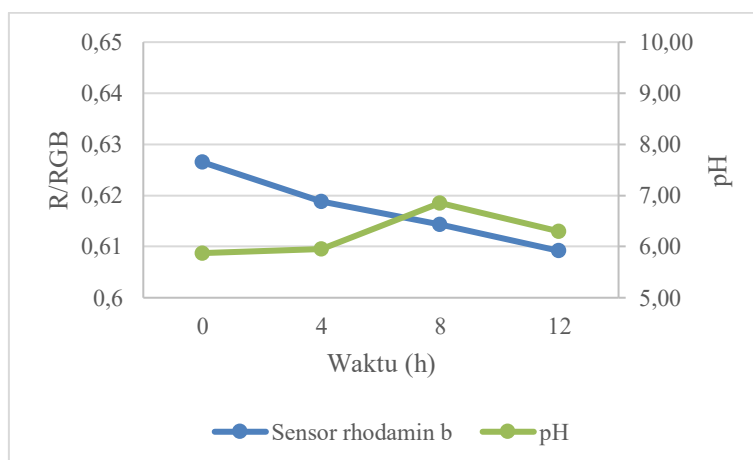
Selain pH, keandalan sensor kertas fluoresen yang dikembangkan dapat ditingkatkan lebih lanjut melalui validasi terhadap indikator kimia dan mikrobiologis lain yang telah mapan untuk mengukur kesegaran daging, seperti TVB-N dan jumlah total koloni (TPC). TVB-N secara luas diakui sebagai parameter kunci yang mewakili akumulasi senyawa basa volatil, termasuk amonia dan amina biogenik, yang dihasilkan selama degradasi protein, sedangkan TPC mencerminkan tingkat proliferasi mikroba yang bertanggung jawab atas proses pembusukan. Integrasi parameter-parameter ini akan memberikan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kinerja sensor dengan mengaitkan respon optiknya tidak hanya pada perubahan fisikokimia tetapi juga pada aktivitas mikroba. Meskipun analisis semacam itu tidak termasuk dalam penelitian ini, penggabungan analisis tersebut dalam penelitian selanjutnya akan secara signifikan meningkatkan ketahanan, akurasi, dan penerapan praktis dari sistem penginderaan yang diusulkan untuk pemantauan kualitas pangan di dunia nyata.



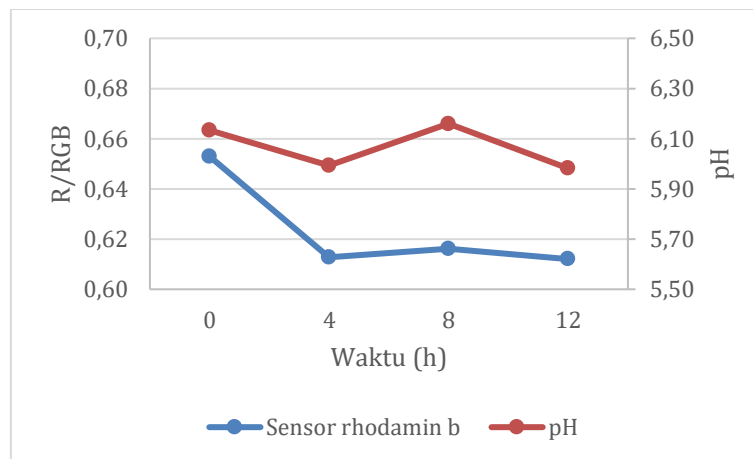
Gambar 4. Hubungan rasio G/RGB pada sensor kurkumin dengan pH pada daging ayam segar selama penyimpanan 12 jam



Gambar 5. Hubungan rasio G/RGB pada sensor kurkumin dengan pH pada daging ayam tiren selama penyimpanan 12 jam



Gambar 6. Hubungan rasio R/RGB pada sensor rhodamin b dengan pH pada daging ayam segar selama penyimpanan 12 jam.



Gambar 7. Hubungan rasio R/RGB pada sensor rhodamin b dengan pH pada daging ayam tiren selama penyimpanan 12 jam.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sensor kertas fluoresen berbasis kurkumin dan rhodamin B yang mampu merespon paparan NH_3 dan emisi volatil dari daging ayam melalui analisis citra digital berbasis rasio warna RGB. Pada uji sensitivitas terhadap uap NH_3 (5–500 ppm), sensor kurkumin menunjukkan peningkatan rasio G/RGB, sedangkan sensor rhodamin B mengalami penurunan rasio R/RGB akibat mekanisme deprotonasi dan *fluorescence quenching*. Respon komplementer tersebut mengkonfirmasi karakter ratiometrik sistem dalam membedakan tingkat paparan amina volatil secara semi-kuantitatif.

Pada pengujian terhadap daging ayam selama penyimpanan 12 jam, sensor menunjukkan pola respon yang berbeda antara ayam segar dan ayam tiren. Pada ayam segar, rasio warna mengalami perubahan bertahap yang mencerminkan dinamika degradasi biokimia dan fluktuasi pH. Sebaliknya, pada ayam tiren, rasio warna relatif stabil, sejalan dengan kondisi degradasi lanjut yang telah terjadi sejak awal pengamatan. Analisis regresi menunjukkan bahwa hubungan antara rasio warna dan pH tidak selalu bersifat linier dan signifikan, kecuali pada parameter G/RGB terhadap pH pada sampel ayam tiren.

Secara keseluruhan, sistem sensor yang dikembangkan berfungsi sebagai indikator semi-kuantitatif untuk mendeteksi perubahan mutu daging ayam berbasis emisi volatil. Pendekatan berbasis citra digital ini berpotensi diaplikasikan sebagai metode deteksi non-destruktif, portabel, dan berbiaya rendah untuk membedakan daging ayam segar dan ayam tiren, meskipun validasi lebih lanjut menggunakan parameter kimia dan mikrobiologis tambahan masih diperlukan untuk meningkatkan tingkat standardisasi analitik.

Saran

Sensor kertas fluoresen berbasis kurkumin dapat direkomendasikan sebagai alat deteksi cepat dan non-destruktif untuk membedakan daging ayam segar dengan ayam tiren, terutama karena responnya yang stabil terhadap perubahan pH dan senyawa volatil basa pada kondisi pembusukan lanjut. Penelitian selanjutnya perlu menguji sensor menggunakan jumlah sampel yang lebih besar serta melakukan validasi silang dengan parameter kesegaran lain, seperti TVB-N dan total plate count, untuk meningkatkan validitas dan penerapan sensor pada kondisi nyata.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia melalui Bantuan Pendanaan Program Penelitian (BIMA Kemendikbudristek) atas dukungan pendanaan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Universitas Brawijaya melalui Laboratorium *Center of Excellence* (COE) Bio-Ai serta Laboratorium Daya dan Mesin Pertanian, Departemen Teknik Biosistem, Fakultas Teknologi Agroindustri dan Biosistem, atas dukungan sarana dan prasarana penelitian. Penulis menggunakan bantuan *artificial intelligence* (AI) dalam penyuntingan dan penyempurnaan bahasa naskah. AI tidak digunakan dalam perancangan penelitian, pengumpulan dan analisis data, interpretasi hasil, maupun pengambilan keputusan ilmiah.

PENDANAAN

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia melalui Bantuan Pendanaan Program Penelitian BIMA Kemendikbudristek, Tahun Anggaran 2025, dengan nomor kontrak induk 064/C3/DT.05.00/PL/2025, nomor kontrak turunan 571/UN10.A0501/B/PT.01.03.2/2025

DAFTAR REFERENSI

- Alizadeh-Sani, M., Tavassoli, M., Mohammadian, E., Ehsani, A., Khaniki, G. J., Priyadarshi, R., & Rhim, J. W. (2021). pH-responsive color indicator films based on methylcellulose/chitosan nanofiber and barberry anthocyanins for real-time monitoring of meat freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.231>
- Allan, D., BCIT School of Health Sciences, Environmental Health, & Heacock, H. (2017). Determining the accuracy of colorimetric pH testing compared to potentiometric methods. *BCIT Environmental Public Health Journal*, 1. <https://doi.org/10.47339/ephj.2017.72>
- Bekhit, A. E. D. A., Holman, B. W. B., Giteru, S. G., & Hopkins, D. L. (2021). Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 109). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.006>
- Chen, S., Han, J., Li, H., Li, S., Li, Y., Guo, D. Y., Wang, S., & Pan, Q. (2025). Sensitive monitoring of meat freshness via changes in fluorescence intensity and wavelength based on protonation-regulated intramolecular charge transfer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 426(May 2024). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.137081>
- Chen, S., & Wei, M. (2018). Impact of fluorescent whitening agent excitation on White Balance Algorithms. *Color Research and Application*, 43(5). <https://doi.org/10.1002/col.22233>
- Choi, Y. H., Kim, J. T., Kim, M. H., & Park, W. H. (2024). Biodegradable poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate)/curcumin composite film as a smart indicator of food spoilage. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 408.

<https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.135511>

- Daly, B., Ling, J., & De Silva, A. P. (2015). Current developments in fluorescent PET (photoinduced electron transfer) sensors and switches. *Chemical Society Reviews*, 44(13). <https://doi.org/10.1039/c4cs00334a>
- Dourou, D., Grounta, A., Argyri, A. A., Froutis, G., Tsakanikas, P., Nychas, G. J. E., Doulgeraki, A. I., Chorianopoulos, N. G., & Tassou, C. C. (2021). Rapid Microbial Quality Assessment of Chicken Liver Inoculated or Not With Salmonella Using FTIR Spectroscopy and Machine Learning. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.623788>
- Gangemi, C. M. A., Mirabile, S., Monforte, M., Barattucci, A., & Bonaccorsi, P. M. (2025). Bioimaging and Sensing Properties of Curcumin and Derivatives. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 26, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/ijms26104871>
- Heir, E., Solberg, L. E., Jensen, M. R., Skaret, J., Grøvlen, M. S., & Holck, A. L. (2022). Improved microbial and sensory quality of chicken meat by treatment with lactic acid, organic acid salts and modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Microbiology*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109498>
- Huang, B., Zhang, K., Kwadzokpui, B. A., Han, E., Guan, B., & Lin, H. (2025). Real-Time Monitoring and Rapid Determination of Pork Freshness Using a Colorimetric Sensor Array Based on Porphyrin and pH Indicator Ligand Combination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(18). <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c01335>
- Hwang, S. H., Lee, J. H., Nam, T. G., Koo, M., & Cho, Y. S. (2022). Changes in physicochemical properties and bacterial communities in carrion Korean native cattle beef during cold storage. *Food Science and Nutrition*, 10(8). <https://doi.org/10.1002/fsn3.2864>
- Iandola, F. N., Han, S., Moskewicz, M. W., Ashraf, K., Dally, W. J., & Keutzer, K. (2017). 50 X Fewer Parameters and < 0.5Mb Model Size. *Iclr*, April 2016.
- Kim, Y., Park, S., Kim, J., & Shin, H. (2022). Development of freshness indicator for monitoring chicken breast quality and freshness during storage. *Food Science and Biotechnology*, 31(3), 377–385. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01034-x>
- Koriyati, L., Marhaeniyanto, E., & Afrila, A. (2019). KUALITAS DAGING AYAM TIREN DAN AYAM SEGAR BROILER DITINJAU DARI KADAR AIR DAN LEMAK. *Fakultas Pertanian*.
- Kossyvaki, D., Barbetta, A., Contardi, M., Bustreo, M., Dziza, K., Lauciello, S., Athanassiou, A., & Fragouli, D. (2022). Highly Porous Curcumin-Loaded Polymer Mats for Rapid Detection of Volatile Amines. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(6). <https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00418>

- Li, J., Zhang, N., Yang, X., Yang, X., Wang, Z., & Liu, H. (2022). RhB@MOF-5 Composite Film as a Fluorescence Sensor for Detection of Chilled Pork Freshness. *Biosensors*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/bios12070544>
- Lin, Y., Ma, J., Sun, D. W., Cheng, J. H., & Zhou, C. (2024). Fast real-time monitoring of meat freshness based on fluorescent sensing array and deep learning: From development to deployment. *Food Chemistry*, 448(March). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139078>
- Liu, C., Chu, Z., Weng, S., Zhu, G., Han, K., Zhang, Z., Huang, L., Zhu, Z., & Zheng, S. (2022). Fusion of electronic nose and hyperspectral imaging for mutton freshness detection using input-modified convolution neural network. *Food Chemistry*, 385. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132651>
- Liu, J., Wang, H., Wang, P., Guo, M., Jiang, S., Li, X., & Jiang, S. (2018). Films based on κ -carrageenan incorporated with curcumin for freshness monitoring. *Food Hydrocolloids*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.012>
- Liu, Z., Zhou, S., Yuan, F., Zhao, Y., Zhou, N., Zhang, W., Li, J., Zhao, Y., Gao, J., Yi, S., & Hou, L. (2025). A novel fluorescence platform for portable and visual monitoring of meat freshness. *Biosensors and Bioelectronics*, 267, 116746. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116746>
- Lu, Z., Li, M., Chen, M., Wang, Q., Wu, C., Sun, M., Su, G., Wang, X., Wang, Y., Zhou, X., Ye, J., Liu, T., & Rao, H. (2023). Deep learning-assisted smartphone-based portable and visual ratiometric fluorescence device integrated intelligent gel label for agro-food freshness detection. *Food Chemistry*, 413, 135640. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135640>
- Luong, N. D. M., Coroller, L., Zagorec, M., Moriceau, N., Anthoine, V., Guillou, S., & Membré, J. M. (2022). A Bayesian Approach to Describe and Simulate the pH Evolution of Fresh Meat Products Depending on the Preservation Conditions. *Foods*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/foods11081114>
- Niu, H., Liu, J., O'Connor, H. M., Gunnlaugsson, T., James, T. D., & Zhang, H. (2023). Photoinduced electron transfer (PeT) based fluorescent probes for cellular imaging and disease therapy. In *Chemical Society reviews* (Vol. 52, Issue 7). <https://doi.org/10.1039/d1cs01097b>
- Odeyemi, O. A., Alegbeleye, O. O., Strateva, M., & Stratev, D. (2020). Understanding spoilage microbial community and spoilage mechanisms in foods of animal origin. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2). <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12526>
- Petropoulou, A., Kralj, S., Karagiorgis, X., Savva, I., Loizides, E., Panagi, M., Krasia-Christoforou, T., & Riziotis, C. (2020). Multifunctional Gas and pH Fluorescent Sensors Based on Cellulose Acetate Electrospun Fibers Decorated with

- Rhodamine B-Functionalised Core-Shell Ferrous Nanoparticles. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57291-0>
- Pothakos, V., Devlieghere, F., Villani, F., Björkroth, J., & Ercolini, D. (2015). Lactic acid bacteria and their controversial role in fresh meat spoilage. *Meat Science*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.014>
- Savarese, M., Raucci, U., Adamo, C., Netti, P. A., Ciofini, I., & Rega, N. (2014). Non-radiative decay paths in rhodamines: New theoretical insights. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(38). <https://doi.org/10.1039/c4cp02622e>
- Shen, X., Xing, L., Pan, L., Miao, Y., & Zhang, W. (2025). Prediction of chicken breast meat freshness based on hyperspectral imaging technique and high-throughput sequencing. *Poultry Science*, 104(4), 104999. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.104999>
- Tan, Z., Huang, Z., Lv, Y., Li, Y., & Chen, D. (2019). A gas Fourier transform infrared spectroscopy methodology for the rapid and accurate discrimination of chicken spoilage through volatiles analysis. *Flavour and Fragrance Journal*, 34(4). <https://doi.org/10.1002/ffj.3500>
- Vanegas, D. C., Patiño, L., Mendez, C., de Oliveira, D. A., Torres, A. M., Gomes, C. L., & McLamore, E. S. (2018). Laser scribed graphene biosensor for detection of biogenic amines in food samples using locally sourced materials. *Biosensors*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/bios8020042>
- Wang, Z., Shi, X., Guo, J., Wang, L., Cao, M., Wang, S., & Chen, Y. (2025b). Drop-on-demand printing of amine-responsive fluorescence-ratiometric sensor array for online monitoring meat freshness. *Food Chemistry: X*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102099>
- Yanestria, S. M., & Wibisono, F. J. (2017). Insiden Peredaran Ayam Tiren Pada Pasar Tradisional di Surabaya. *Jurnal Kajian Veteriner*, 5(1).
- Yıldız, A., & Arslan Duru, A. (2019). Etlik Piliç Yetiştiriciliğinin Geliştirilmesi Açısından Tavuk Eti Tüketim Alışkanlıklarının İncelenmesi: Uşak İli Örneği. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7(6). <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i6.833-839.2180>
- Zhai, X., Xue, Y., Song, W., Sun, Y., Shen, T., Zhang, X., Li, Y., Ding, F., Zhang, D., Zhou, C., Arslan, M., Tahir, H. E., Li, Z., Shi, J., Huang, X., & Zou, X. (2024). A ratiometric fluorescent electrospun film with high amine sensitivity and stability for visual monitoring of livestock meat freshness. *Food Chemistry: X*, 24(September), 101801. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101801>
- Zhang, J., Yang, Y., Zeng, L., & Wang, J. (2024). A ratiometric fluorescence platform for on-site screening meat freshness. *Food Chemistry*, 436(August 2023), 137769. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137769>