

Antosianin Sebagai Senyawa Bioresponsif Dalam Kemasan Cerdas Untuk Indikator Kesegaran Pangan: Tinjauan Komprehensif

Maya Indra Rasyid^{1,2}, Isnaini Rahmadi^{1,3}, Hilka Yuliani^{1,2*}

¹Program studi Ilmu Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, Bogor

²Program Studi Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Teuku Umar, Aceh Barat

³Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Sains, Teknik, dan Desain, Universitas Trilogi

*Email korespondensi : hilka.yuliani@utu.ac.id

ABSTRAK

Kemasan cerdas terus berkembang karena mampu memberikan informasi kualitas pangan secara *real-time*. Salah satu jenis kemasan cerdas adalah indikator kesegaran. Indikator kesegaran didasarkan pada penggunaan pewarna yang sensitif terhadap variasi pH yang menyebabkan perubahan yang terlihat pada warna indikator. Antosianin cocok sebagai indikator karena memiliki spektrum serapan warna yang bervariasi menurut pH, suhu, dan keberadaan gas tertentu. Tulisan ini merangkum berbagai penelitian tentang persiapan, efektivitas, serta metode peningkatan stabilitas antosianin sebagai indikator kesegaran pangan. Literatur nasional dan internasional dari Google Scholar, Web of Science, dan Scopus sejak tahun 2014 sampai 2024 yang relevan ditinjau dan disusun. Kata kunci utama yang digunakan dalam mengumpulkan literatur antara lain bahan kemasan bioaktif, senyawa bioaktif antosianin, kemasan cerdas, perubahan pH, dan indikator kesegaran. Faktor-faktor yang memengaruhi kinerja antosianin dan prinsip perubahan warna yang responsif terhadap pH juga ditinjau pada tulisan ini. Kesegaran pangan berkaitan dengan perubahan kimia akibat aktivitas mikroba. Oleh karena itu, indikator kesegaran harus ditempatkan di dalam kemasan. Jenis dan konsentrasi ekstrak antosianin berperan penting dalam menentukan sejauh mana perubahan karakteristik kemasan. Indikator kesegaran dapat dikembangkan dari antosianin dengan polimer atau campuran polimer, seperti pati, kitosan, polivinil alkohol, selulosa mikrokristalin, dan gelatin. Indikator kesegaran menggunakan antosianin menunjukkan potensinya sebagai indikator kesegaran pangan. Stabilitas label kesegaran dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan teknologi nano.

Kata kunci: Antosianin, indikator kesegaran, kemasan, perubahan pH

ABSTRACT

Smart packaging continues to grow as it is able to provide real-time food quality information. One type of smart packaging is the freshness indicator. Freshness indicators are based on the use of dyes that are sensitive to pH variations that cause visible changes in the color of the indicator. Anthocyanins are suitable as indicators because they have a color absorption spectrum that varies with pH, temperature, and the presence of certain gases. This paper summarizes various studies in the preparation, effectiveness, and methods for improving anthocyanin stability as an indicator of food freshness. Relevant domestic and international literature from Google Scholar, Web of Science, and Scopus from 2014 to 2024 was reviewed and compiled. The main keywords used in collecting literature include bioactive packaging materials, anthocyanin bioactive compounds, smart packaging, pH changes, and freshness indicators. Factors affecting anthocyanin performance and the principle of pH-responsive color change are also reviewed in this paper. Food freshness is related to chemical changes due to microbial activity. Therefore, freshness indicators should be placed inside the package. The type and concentration of anthocyanin extracts play an important role in determining the extent of changes in packaging characteristics. Freshness indicators can be developed from anthocyanins with polymers or polymer blends, such as starch, chitosan, polyvinyl alcohol, microcrystalline cellulose, and gelatin. Freshness indicators using anthocyanins show their potential as food freshness indicators. The stability of freshness labels can be improved by utilizing nanotechnology.

Keywords: Anthocyanins, freshness indicator, packaging, pH change

PENDAHULUAN

Pengemasan merupakan bagian penting untuk menjaga kualitas pangan selama penyimpanan, transportasi, dan konsumsi di rumah tangga. Pengemasan diperlukan untuk melindungi pangan dari faktor eksternal, seperti kontaminan, komposisi gas atmosfer, bakteri pembusuk, beban mekanis, dan kerusakan fisik (Fadji et al., 2023). Pengemasan juga berperan penting untuk memperpanjang masa simpan pangan. Masa simpan ini berhubungan dengan bertahannya karakteristik rasa, warna, aroma, tekstur, nilai gizi, dan keamanan pangan dalam kondisi lingkungan yang ditentukan (Vasile & Baican, 2021).

Peran pengemasan saat ini semakin luas, meliputi perlindungan, pengawetan, penahanan, kemudahan, komunikasi, pengurangan limbah makanan, keterlacakan, pemasaran, informasi, dan indikasi kerusakan (Abekoon et al., 2024; Müller & Schmid, 2019). Namun, saat ini tanggal kedaluwarsa umumnya digunakan untuk menentukan waktu penarikan produk. Kondisi ini mendorong pengembangan sistem kemasan yang dapat dengan mudah dimasukkan ke dalam bagian kemasan dan mampu memberikan informasi kualitas pangan secara *real-time* (Doderio et al., 2021). Sistem kemasan dikenal sebagai kemasan cerdas atau *intelligent packaging*.

Kemasan cerdas mampu memantau dan menampilkan status kualitas dari produksi hingga sampai konsumen. Pemantauan ini dapat meminimalkan pemborosan makanan, melindungi konsumen terhadap potensi keracunan makanan, memaksimalkan efisiensi industri makanan, dan meningkatkan ketertelusuran (Müller & Schmid, 2019). Salah satu contoh kemasan tersebut adalah kemasan dengan indikator kesegaran yang dapat memberikan informasi mengenai kesegaran pangan (Drago et al., 2020).

Indikator kesegaran merupakan perangkat cerdas yang memungkinkan pemantauan kualitas produk pangan selama penyimpanan dan pengangkutan. Indikator kesegaran dapat memberikan informasi langsung tentang kualitas produk akibat pertumbuhan mikroba (Drago et al., 2020). Hal ini karena indikator kesegaran didasarkan pada penggunaan pewarna yang sensitif terhadap perubahan pH yang disebabkan oleh kerusakan produk, yang kemudian menyebabkan perubahan yang terlihat pada warna indikator. Indikator ini umumnya terdiri dari matriks polimer yang mengandung zat warna yang responsif terhadap perubahan pH, seperti *bromocresol purple*, *bromocresol green*, *bromophenol blue*, *methyl red*, and *cresol red* (Drago et al., 2020).

Indikator kesegaran berbasis bahan alam juga dapat menjadi alternatif pengganti indikator kesegaran berbasis bahan kimia di atas. Pewarna alami seperti ekstrak kurkumin, kulit anggur dan bit, kubis merah, kelopak dan bunga saffron, buah barberry, dan bunga *Althaea officinalis* dapat digunakan sebagai bahan indikator kesegaran (Alizadeh-Sani et al., 2021; Drago et al., 2020; Khazaei et al., 2024; Tavassoli et al., 2022). Indikator kesegaran dari pigmen alami, baik yang berasal dari buah-buahan, sayuran, bunga, dan biji-bijian, umumnya lebih disukai. Hal ini karena sifatnya yang non-karsinogenik, ramah lingkungan, ketersediaan melimpah, dan efektivitas biaya (Khazaei et al., 2024).

Bahan alami ini dapat digunakan sebagai indikator kesegaran karena mengandung pigmen alami, seperti antosianin. Antosianin bersifat bioresponsif, yaitu memiliki spektrum serapan warna yang bervariasi menurut pH, suhu, dan keberadaan gas tertentu di lingkungan (Alizadeh-Sani et al., 2021). Antosianin banyak diteliti karena sumbernya yang luas dan kaya akan warna. Antosianin juga telah digunakan untuk memantau kesegaran ikan, udang, dan susu (Liu et al., 2022). Antosianin dengan polimer atau campuran polimer telah digunakan secara luas dalam pengembangan indikator kesegaran pangan. Polimer atau campuran polimer diantaranya pati, kitosan, polivinil alkohol, mikrokristalin selulosa, dan gelatin (Kwak & Min, 2024). Namun, antosianin rentan terhadap degradasi karena faktor fisik, faktor kimia, substrat pangan, dan metode pengolahan (Zhang et al., 2024). Maka diperlukan proses kopigmentasi untuk menstabilkan strukturnya (Kwak & Min, 2024).

Penelitian menunjukkan bahwa kopigmentasi dengan protein dan polisakarida merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan stabilitas antosianin. Selain itu, polisakarida dapat meningkatkan stabilitas antosianin melalui teknik nanoenkapsulasi (Kwak & Min, 2024). Hal ini dibuktikan oleh hasil penelitian Khazaei et al., (2024) tentang indikator kesegaran menggunakan *nanofiber* dari campuran *tragacanth gum-pectin*, ekstrak *Althaea officinalis* dan *chitin nanowhiskers*. Hasilnya menunjukkan *nanofiber* tetap stabil setelah tiga siklus perendaman pada larutan buffer asam dan basa. Oleh karena itu, dalam artikel ini akan dibahas peranan antosianin sebagai senyawa bioresponsif dalam kemasan cerdas untuk indikator kesegaran pangan. Selain itu, dalam artikel ini juga membahas persiapan, efektivitas, serta metode peningkatan stabilitas antosianin sebagai

indikator kesegaran pangan pada berbagai penelitian.

METODOLOGI

Pencarian literatur untuk tinjauan komprehensif ini menggunakan tiga mesin pencarian/database yaitu Google Scholar, Web of Science dan Scopus dari tahun 2014 hingga tahun 2024. Kata kunci utama yang digunakan dalam mengumpulkan literatur yang relevan adalah bahan kemasan bioaktif, senyawa bioaktif antosianin, kemasan cerdas, perubahan pH, dan indikator kesegaran, yang terdiri dari artikel penelitian dan ulasan asli. Semua artikel yang diambil disaring terlebih dahulu berdasarkan judul dan abstrak. Teks lengkap dari artikel yang berpotensi relevan ditinjau untuk mengonfirmasi kelayakan. Dari pencarian artikel yang dilakukan, didapatkan 22 artikel yang lolos dalam seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, sehingga dapat dijadikan bahan acuan utama dalam literatur review ini.

PEMBAHASAN

Mekanisme Utama Kemasan Cerdas

Sistem pengemasan cerdas bergantung pada tiga teknologi utama, yaitu: indikator, pembawa data, dan sensor (Azeredo & Correa, 2021).

1. Indikator

Fungsi utama indikator adalah menyampaikan informasi kepada konsumen mengenai berbagai atribut terkait mutu produk pangan. Mayoritas teknologi indikator memanfaatkan prinsip perubahan warna (kolorimetri), meskipun mekanisme alternatif seperti penggunaan zat warna fluoresen juga telah dikembangkan (Kiryukhin et al., 2018). *Output* dari sistem ini dapat berupa informasi tentang keberadaan/konsentrasi senyawa target atau tingkat kemajuan suatu reaksi, yang dihasilkan dari interaksi antara indikator dengan komponen dalam pangan (Ghaani et al., 2016; Kalpana et al., 2019). Dilihat dari penerapannya pada kemasan, jenis indikator yang paling banyak digunakan adalah yang merespons perubahan suhu (*time-temperature indicator*) dan yang mendeteksi penurunan kesegaran (*freshness indicator*).

a. Indikator Suhu

Karena suhu merupakan faktor penentu utama laju kerusakan pangan, pengendaliannya menjadi kunci stabilitas, khususnya bagi produk yang memerlukan pendinginan dan pembekuan. Pada rantai dingin, penyimpangan suhu (termasuk fluktuasi) tidak hanya menyebabkan degradasi tekstur seperti pemisahan emulsi atau kerusakan sel pada makanan beku-cair, tetapi

juga dapat memicu proliferasi mikroba psikrotrofik (Azeredo & Correa, 2021).

b. Indikator kesegaran

Indeks kesegaran berfungsi sebagai indikator penurunan kualitas produk. Pada umumnya, kemasan dilengkapi dengan *time-temperature indicator* (TTI) atau alat serupa yang bersifat irreversibel, yang menginformasikan konsumen terkait terjadinya perubahan mikrobiologis dan/atau kimiawi yang mengarah pada pembusukan produk pangan (Kalpana et al., 2019). Pada produk daging khususnya, penetapan kesegaran dapat merujuk pada akumulasi amina biogenik (Sørensen et al., 2018) atau deteksi hidrogen sulfida (H_2S) sebagai senyawa volatil yang dilepaskan selama proses pembusukan (Zhai et al., 2019). Dalam produk makanan laut, kadar total basa nitrogen volatil yang utamanya mencakup dimetilamina (DMA), trimetilamina (TMA), dan ammonia yang secara luas diterima sebagai parameter untuk menilai tingkat degradasi microbial (Morsy et al., 2016). Metode deteksi untuk indikator kesegaran ini dapat memanfaatkan analisis ruang kepala (*headspace*) pada kemasan pangan. Sebagai contoh, Zhai et al. (2019) mendemonstrasikan penggunaan nanopartikel perak (Ag) untuk mendeteksi H_2S pada produk daging, serta mengembangkan suatu sistem sensor berbasis serangkaian senyawa kimia sensitif untuk mendeteksi amina volatil pada ikan (Morsy et al., 2016).

Perubahan pH akibat aktivitas mikroba atau reaksi kimia dapat berfungsi sebagai parameter tidak langsung untuk memantau kerusakan pangan. Perubahan ini umumnya disebabkan oleh akumulasi asam organik dari metabolisme mikroba atau pembentukan asam karbonat dari pelarutan CO_2 . Oleh karena itu, pemantauan pH merupakan metode yang efektif untuk mendeteksi kerusakan mikrobial (Yousefi et al., 2019). Prinsip inilah yang mendasari sebagian besar indikator kesegaran berbasis pewarna pH-sensitif. Pewarna tersebut dapat berasal dari sumber sintetis, seperti bromokresol hijau dan metil merah, maupun sumber alami, termasuk antosianin, betalain, dan kurkumin (Wu et al., 2021).

Meskipun pewarna sintetis umumnya menawarkan keunggulan dalam hal biaya, stabilitas, dan intensitas warna, minat terhadap pewarna alami *food-grade* seperti antosianin semakin meningkat. Peralihan preferensi ini didorong terutama oleh karakteristiknya yang biodegradable serta persepsi konsumen yang sering kali tidak sepenuhnya didukung oleh bukti ilmiah bahwa senyawa alami lebih sehat dan aman dibandingkan dengan analog sintetisnya (Alizadeh-Sani et al., 2020).

2. Pembawa Data

Pembawa data, seperti kode batang dan label identifikasi frekuensi radio (RFID), dirancang khusus untuk melacak pergerakan produk di sepanjang rantai pasokan. Fungsi utamanya terletak pada pendukung otomatisasi, penjaminan ketertelusuran, serta upaya pencegahan pencurian dan pemalsuan (Ghaani et al., 2016). Berbeda dengan perangkat pemantau kualitas *real-time*, teknologi ini pada umumnya tidak dimaksudkan untuk mengumpulkan informasi langsung mengenai status kesegaran atau kondisi pangan.

Dua jenis pembawa data utama yang digunakan dalam kemasan pangan adalah label kode batang dan label identifikasi frekuensi radio (RFID). Kode batang beroperasi sebagai pola grafis yang dapat dibaca mesin, terdiri dari sekuens batang dan spasi atau larik titik dan spasi yang menyandikan data tertentu. Informasi ini kemudian didekodekan oleh pemindai optik dan diteruskan ke sistem komputer untuk penyimpanan dan pemrosesan (Ghaani et al., 2016; Sohail et al., 2018). Sebagai alternatif yang lebih canggih, sistem RFID memanfaatkan komunikasi nirkabel antara sebuah tag yang melekat pada produk dan sebuah pembaca (*interrogator*). Sistem ini terdiri dari tiga komponen inti: (1) sebuah tag RFID yang mengandung antena dan chip sirkuit terintegrasi untuk identifikasi unik serta penyimpanan data, (2) sebuah pembaca yang memancarkan gelombang radio dan menerima sinyal balik dari tag, serta (3) sebuah unit pemroses data (seperti komputer atau *smartphone*) untuk mengelola informasi yang diterima (Bibi et al., 2017).

3. Sensor Kimia

Sensor kimia beroperasi dengan mendeteksi analit tertentu secara cepat melalui konversi informasi kimia menjadi sinyal keluaran yang terukur dan proporsional terhadap konsentrasi analit. Sinyal ini selanjutnya diproses oleh perangkat elektronik dan perangkat lunak yang sesuai (Ghaani et al., 2016). Secara struktural, sebuah sensor kimia terdiri dari empat komponen utama:

- Reseptor (Unsur Pengindra):** Merupakan area pengambilan sampel tempat interaksi kimia spesifik dengan analit terjadi.
- Transduser (Unsur Pengukur):** Mengonversi respons kimia atau fisika dari reseptor menjadi sinyal listrik yang dapat diolah (misalnya, elektroda).
- Unit Pemrosesan Sinyal Elektronik:** Memproses dan menguatkan sinyal listrik dari transduser.

- Unit Tampilan (Umumnya Tersedia):** Menampilkan hasil pengukuran dalam format yang dapat diinterpretasi oleh pengguna (Ghaani et al., 2016).

Sensor kimia beroperasi melalui interaksi spesifik antara reseptor dengan analit target, yang selanjutnya dikonversi oleh transduser menjadi sinyal terukur (biasanya listrik atau optik). Klasifikasi sensor ini umumnya didasarkan pada prinsip transduksinya, mencakup kategori elektrik, elektrokimia, optik, dan gravimetri (Teodoro et al., 2021). Dalam konteks keamanan pangan, sensor kimia telah dikembangkan untuk mendeteksi gas volatil yang dilepaskan selama proses pembusukan. Sebagai contoh, sensor kapasitif telah berhasil digunakan untuk memantau konsentrasi amonia (NH_3), trimetilamina (TMA), etanol, dan hidrogen sulfida (H_2S) yang diemisikan dari daging ayam yang mengalami degradasi (Senapati & Sahu, 2020).

Antosianin dalam Kemasan Cerdas

Kemasan cerdas didefinisikan sebagai sistem teknologi yang mampu mentransmisikan informasi, mendukung proses pengambilan keputusan, menjamin kualitas produk, dan memberikan peringatan sebagai respons terhadap perubahan yang terdeteksi di lingkungan eksternal maupun internal kemasan (Sheibani et al., 2024). Umumnya, indikator untuk kemasan cerdas terdiri dari komponen kecil yang diletakkan di dalam bahan kemasan atau dipasang di permukaan luar bahan kemasan (Müller & Schmid, 2019).

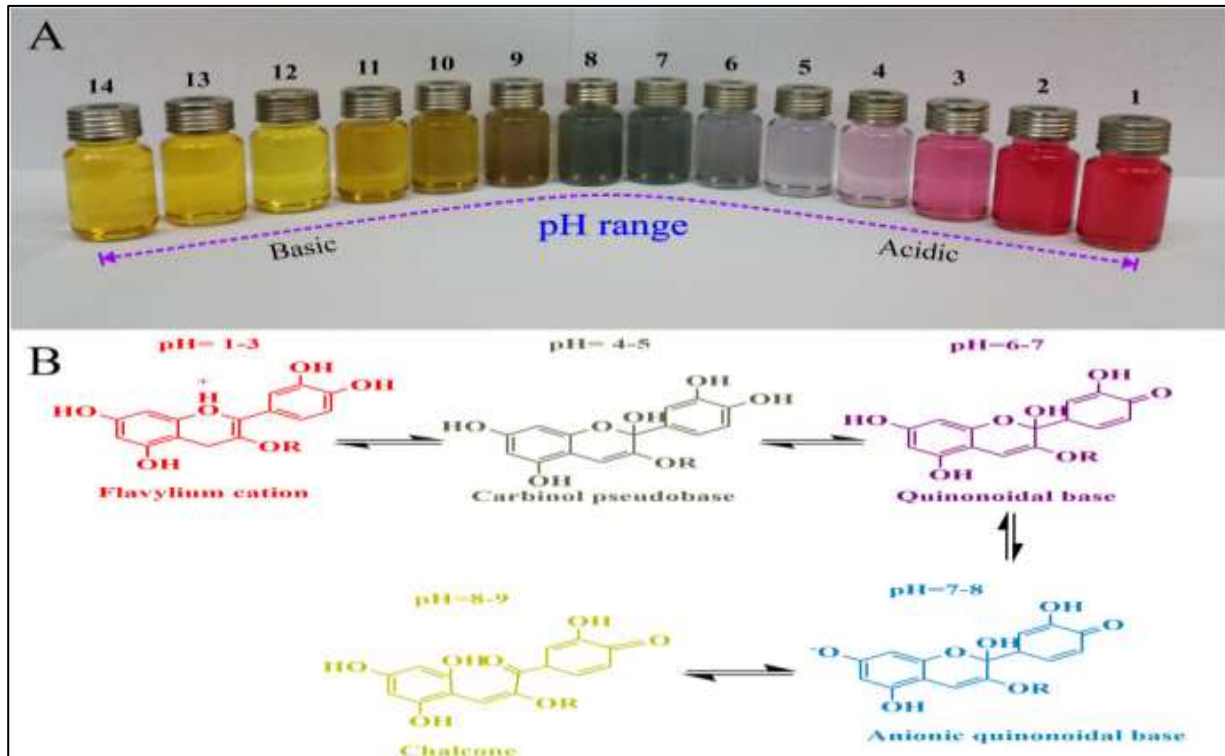
Senyawa bioaktif dalam kemasan cerdas dapat berperan sebagai pewarna alami yang mengalami perubahan warna sebagai respons terhadap rangsangan tertentu, seperti perubahan pH atau suhu. Pewarna ini berfungsi sebagai indikator visual untuk menilai kesegaran atau kerusakan produk pangan. Salah satu senyawa bioaktif yang berperan sebagai indikator adalah antosianin. Antosianin merupakan sejenis polifenol yang dihasilkan sebagai metabolit sekunder dalam tanaman dan termasuk dalam sub-kelas flavonoid. Senyawa ini bertindak sebagai pewarna alami yang memberikan warna cerah pada buah, sayuran, daun, dan bunga. Struktur dasar antosianin terdiri dari kation flavilium. Antosianidin yang umum ditemukan di alam, yang merupakan aglikon dari antosianin, meliputi sianidin, delphinidin, peonidin, petunidin, malvidin, dan pelargonidin (Sivapragasam et al., 2024).

Antosianin merupakan agen responsif pH yang berwarna, yang memungkinkan penilaian atribut kualitatif secara andal dan *real-*

time terhadap pangan yang dikemas. Senyawa aktif ini juga meningkatkan stabilitas dan fungsi matriks kemasan atau pelapis. Sebagai biosensor, senyawa yang kaya antosianin yang diekstraksi dari berbagai sumber tanaman menggunakan pelarut berbasis bio, seperti etanol dan air, sangat penting untuk sistem kemasan pangan cerdas (Sheibani et al., 2024).

Dampak Antosianin terhadap Karakteristik Kemasan Cerdas

Selain memberikan berbagai fungsi pada bahan kemasan, antosianin juga dapat memengaruhi sifat teknologi dari kemasan cerdas. Jenis dan konsentrasi ekstrak antosianin berperan penting dalam menentukan perubahan pada karakteristik



Gambar 1. Perubahan warna antosianin pada berbagai pH, (A) Perubahan warna larutan antosianin, (B) Transformasi struktural antosianin dalam berbagai larutan buffer (Alizadeh-Sani et al., 2021)

Keberadaan cincin aromatik dan konjugasi membuat antosianin berfungsi sebagai kromofor, sehingga senyawa ini sensitif terhadap perubahan pH. Umumnya, pada pH asam ($pH < 4$), antosianin berwarna merah, dan saat pH meningkat, warnanya berubah dari pink/purple ($pH 6-7$) menjadi biru ($pH 7-8$), dan akhirnya kuning ($pH > 8$). Perubahan warna antosianin pada berbagai pH ditunjukkan Gambar 1. Pergeseran batokromik atau pergeseran absorpsi ke arah panjang gelombang yang lebih panjang yang terjadi pada antosianin dapat digunakan sebagai indikator visual untuk memantau isi kemasan. Penelitian menunjukkan bahwa antosianin dapat meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas termal film berbasis pati berkat pembentukan ikatan hidrogen dan penghubungan antar-molekul. Selain itu, antosianin juga memiliki kapasitas antioksidan dan sifat antimikroba. Oleh karena itu, antosianin dapat dianggap sebagai pilihan yang tepat untuk digunakan dalam kemasan makanan cerdas (Sivapragasam et al., 2024).

bahan kemasan. Interaksi kimia antara polimer kemasan dan ekstrak antosianin memengaruhi struktur bahan. Contohnya, penambahan antosianin dari lobak merah ke dalam matriks campuran film kitosan dan zein secara signifikan mengubah sifat film cerdas dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Penambahan antosianin diketahui meningkatkan kompatibilitas antara zein dan kitosan melalui pembentukan ikatan hidrogen baru, yang menghasilkan komposit yang lebih padat, seragam, dan homogen. Konsentrasi antosianin yang lebih tinggi menghasilkan struktur yang lebih teratur dan kristalin dalam kompleks kitosan-zein. Sifat mekanik komposit juga terpengaruh, dengan peningkatan kekuatan tarik dan penurunan perpanjangan saat putus, meskipun stabilitas termal tetap tidak dipengaruhi (Sivapragasam et al., 2024).

Selain itu, pencampuran antosianin dengan senyawa lain dapat meningkatkan sifat fungsionalnya. Misalnya, penambahan ekstrak antosianin dari daun kol merah ke dalam film polivinil alkohol (PVA) yang dicampur dengan

pati dan dihubungkan dengan glutaraldehid. Hasilnya diperoleh struktur yang lebih homogen dibandingkan dengan permukaan kasar yang terlihat pada butiran PVA perlakuan kontrol. Penambahan ekstrak propolis ke dalam campuran meningkatkan homogenitas dan kelancaran permukaan komposit, kemungkinan disebabkan oleh pengurangan gaya antar-molekul antara rantai polimer dan peningkatan jarak antar rantai. Antosianin tunggal (5%) tidak berpengaruh pada kristalinitas dan sifat mekanik matriks PVA-pati, sedangkan penambahan ekstrak propolis menurunkan kristalinitas dan perpanjangan, tetapi meningkatkan kekuatan tarik dibandingkan antosianin. Senyawa fenolik dalam kedua senyawa bioaktif tersebut mengurangi permeabilitas uap air karena kemungkinan adanya interaksi hidrogen dengan matriks PVA-pati (Mustafa et al., 2020).

Aplikasi Antosianin dalam Kemasan Cerdas

Indikator kesegaran berdasarkan perubahan pH penting dalam rantai pasok pangan karena dapat mendeteksi reaksi kimia atau pertumbuhan mikroba. Kerusakan pangan umumnya berkorelasi langsung dengan perubahan pH, maka penggunaan indikator kesegaran berbasis antosianin merupakan alternatif untuk menilai kualitas pangan tersebut secara *real time*. Antosianin dapat bereaksi dengan gas yang dihasilkan selama pembusukan makanan, dan antosianin menunjukkan struktur kimia yang berbeda dan warna yang bervariasi tergantung pada pH (Kwak & Min, 2024).

Berbagai indikator pH berbasis antosianin telah dikembangkan sebagai indikator kesegaran melalui perubahan warna. Indikator ini dikembangkan dari ekstrak antosianin dengan polimer atau campuran polimer, seperti pati, kitosan, polivinil alkohol, selulosa mikrokristalin, dan gelatin. Indikator-indikator ini digunakan untuk memantau perubahan pH pada berbagai jenis makanan, seperti udang, kepiting, daging ayam, dan fillet ikan (Kwak & Min, 2024). Label berbasis antosianin terbukti memiliki aplikasi yang baik sebagai indikator kesegaran pangan. Hal ini karena memiliki potensi antioksidan dan aktivitas antimikroba (Chen et al., 2024)

Antosianin tidak stabil karena faktor fisik (suhu, cahaya dan oksigen), faktor kimia (pH, sulfat, SO₂, asam askorbat, produk oksidasi dan enzim), substrat pangan (ion logam, protein, polifenol, dan polisakarida), dan metode pengolahan (Zhang et al., 2024). Kondisi tersebut dapat menyebabkan degradasi antosianin yang memengaruhi warna dan fungsinya. Hal ini membatasi kegunaannya

sebagai pewarna dalam indikator kesegaran pangan. Kelemahan ini dapat diatasi melalui proses kopigmentasi yang melibatkan interaksi antosianin dengan kopigmen untuk menstabilkan strukturnya. Kopigmen dapat dikategorikan menjadi tiga jenis yaitu biopolimer, fenolat, dan ion logam (Kwak & Min, 2024). Penelitian menunjukkan bahwa kopigmentasi dengan protein dan polisakarida merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan stabilitas antosianin (Zhang et al., 2024).

Penelitian Kwak & Min (2024). yang mengembangkan indikator kesegaran berbasis polivinil alkohol dengan menggunakan antosianin kubis merah yang dikopigmentasi dengan gelatin dan asam galat. Hasilnya diperoleh indikator ini sangat tahan terhadap paparan cahaya dan menunjukkan perubahan warna yang berbeda dalam larutan buffer pH 2-11. Perubahan warna yang dihasilkan yaitu dari ungu menjadi biru. Penambahan gelatin dan asam galat sebagai kopigmen berperan untuk memfasilitasi ikatan hidrogen yang dapat meningkatkan stabilitas termal dan kelarutan dalam air tanpa mengorbankan sifat tariknya. Oleh karena itu, indikator ini menunjukkan potensinya sebagai indikator kesegaran daging sapi mentah.

Selain itu, polisakarida dapat meningkatkan stabilitas dan antosianin melalui teknik nanoenkapsulasi (Zhang et al., 2024). Hal ini dibuktikan oleh hasil penelitian Khazaei et al., (2024) tentang indikator kesegaran menggunakan *nanofiber* dari campuran *tragacanth gum-pectin*, ekstrak *Althea officinalis* dan *chitin nanowhiskers*. Hasilnya menunjukkan *nanofiber* tetap stabil setelah tiga siklus perendaman (7 menit) pada larutan buffer asam (pH 2) dan basa (pH 11). Sampel *nanofiber* tersebut menunjukkan warna merah dan cokelat kekuningan setelah direndam ke dalam larutan penyangga asam dan basa tanpa perbedaan yang mencolok dari nilai siklus pertama. Hal ini mengindikasikan daya tahan atau stabilitas warna yang baik dan dapat digunakan kembali.

Nanofiber yang dihasilkan pada penelitian Khazaei et al., (2024) juga diaplikasikan untuk mengontrol kesegaran ayam fillet. Setelah masa penyimpanan dalam lemari pendingin selama empat hari, warna *nanofiber* berubah dari putih menjadi cokelat kekuningan. Nilai L* *nanofiber* berkurang secara signifikan dari 90,19 sampai 90,39 (hari ke-0) menjadi 52,12 sampai 52,38 (hari ke-4). Nilai a* *nanofiber* meningkat secara signifikan dari -2,23 sampai -2,09 (hari ke-0) menjadi 12,25 sampai 12,34 (hari ke-4). Nilai b* *nanofiber* juga meningkat secara signifikan dari

0,15 sampai 0,18 (hari ke-0) menjadi 32,01 sampai 32,33 (hari ke-4). Hal ini menunjukkan *nanofiber* responsif terhadap perubahan pH daging ayam fillet, karena *nanofiber* berubah warna seiring dengan waktu penyimpanan. Namun, perlu dievaluasi lebih lanjut pada kondisi kemasan yang lebih kompleks, seperti penurunan dan kenaikan suhu yang signifikan.

KESIMPULAN

Kesegaran suatu pangan berkaitan dengan pertumbuhan mikroba menyebabkan perubahan konsentrasi metabolit tertentu. Metabolit ini dapat terdeteksi menggunakan indikator kesegaran yang ditempatkan di dalam kemasan. Jenis dan konsentrasi ekstrak antosianin berperan penting dalam menentukan tingkat sensitivitas kemasan. Indikator kesegaran dapat dikembangkan dari antosianin dengan polimer atau campuran polimer, seperti pati, kitosan, polivinil alkohol, selulosa mikrokristalin, dan gelatin. Indikator kesegaran menggunakan antosianin menunjukkan potensinya sebagai indikator kesegaran pangan, seperti udang, kepiting, daging ayam, daging sapi, dan fillet ikan. Stabilitas label kesegaran dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan teknologi nano, seperti *nanofiber*. Namun, sistem kemasan ini perlu dievaluasi lebih lanjut pada kondisi kemasan yang lebih kompleks. Aspek biaya produksi kemasan cerdas dengan teknologi nano juga perlu dikurangi untuk memenuhi persyaratan aplikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Abekoon, T., Buthpitiya, B. L. S. K., Sajindra, H., Samarakoon, E. R. J., Jayakody, J. A. D. C. A., Kantamaneni, K., & Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review to evaluate the synergy of intelligent food packaging with modern food technology and artificial intelligence field. *Discover Sustainability*, 5(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00371-7>

Alizadeh-Sani, M., Mohammadian, E., Rhim, J.-W., & Jafari, S. M. (2020). pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 93–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.014>

Alizadeh-Sani, M., Tavassoli, M., McClements, D. J., & Hamishehkar, H. (2021). Multifunctional halochromic packaging materials: Saffron petal anthocyanin loaded-chitosan nanofiber/methyl

cellulose matrices. *Food Hydrocolloids*, 111, 106237. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106237>

Azeredo, H. M. C., & Correa, D. S. (2021). Smart choices: Mechanisms of intelligent food packaging. *Current Research in Food Science*, 4, 932–936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crf.2021.11.016>

Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N., & Sorli, B. (2017). A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 91–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.013>

Chen, Y., Liu, H., Yang, D., Fu, Y., & Shi, J. (2024). Research on Anthocyanin-Based Indicator Labels and the Freshness Preservation. In H. Song, M. Xu, L. Yang, L. Zhang, & S. Yan (Eds.), *Innovative Technologies for Printing, Packaging and Digital Media. CACPP 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 11(44), 212–218. Springer Nature Singapore.

Dodero, A., Escher, A., Bertucci, S., Castellano, M., & Lova, P. (2021). Intelligent Packaging for Real-Time Monitoring of Food-Quality: Current and Future Developments. In *Applied Sciences* 11(8), 1–19. <https://doi.org/10.3390/app11083532>

Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., & Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*, 9(11), 1–42. <https://doi.org/10.3390/foods9111628>

Fadiji, T., Rashvand, M., Daramola, M. O., & Iwarere, S. A. (2023). A Review on Antimicrobial Packaging for Extending the Shelf Life of Food. In *Processes*. 11(2) 1–30. <https://doi.org/10.3390/pr11020590>

Ghaani, M., Cozzolino, C. A., Castelli, G., & Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008>

Kalpna, S., Priyadarshini, S. R., Maria Leena, M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 145–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.008>

- Khazaei, F., Shavisi, N., & Shahbazi, Y. (2024). Intelligent pH-sensitive tragacanth gum-pectin nanofiber mats encapsulating *Althaea officinalis* extract and chitin nanowhiskers to track the freshness of chicken fillets. *LWT*, 2(6), 11-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116606>
- Kiryukhin, M. V., Lau, H. H., Goh, S. H., Teh, C., Korzh, V., & Sadovoy, A. (2018). A membrane film sensor with encapsulated fluorescent dyes towards express freshness monitoring of packaged food. *Talanta*, 182, 187–192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.01.085>
- Kwak, M., & Min, S. C. (2024). Monitoring Meat Freshness with Intelligent Colorimetric Labels Containing Red Cabbage Anthocyanins Copigmented with Gelatin and Gallic Acid. *Foods*, 13(21), 1–21. <https://doi.org/10.3390/foods13213464>
- Liu, L., Wu, W., Zheng, L., Yu, J., Sun, P., & Shao, P. (2022). Intelligent packaging films incorporated with anthocyanins-loaded ovalbumin-carboxymethyl cellulose nanocomplexes for food freshness monitoring. *Food Chemistry*, 387, 132908. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132908>
- Morsy, M. K., Zór, K., Kostesha, N., Alstrøm, T. S., Heiskanen, A., El-Tanahi, H., Sharoba, A., Papkovsky, D., Larsen, J., Khalaf, H., Jakobsen, M. H., & Emnéus, J. (2016). Development and validation of a colorimetric sensor array for fish spoilage monitoring. *Food Control*, 60, 346–352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.07.038>
- Müller, P., & Schmid, M. (2019). Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. *Foods*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/foods8010016>
- Mustafa, Pakeeza, Niazi, Muhammad Bilal Khan, Jahan, Zaib, Rafiq, Sikander, Ahmad, Tahir, Sikander, Umair, & Javaid, Farhan. (2020). Improving functional properties of PVA/starch-based films as active and intelligent food packaging by incorporating propolis and anthocyanin. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9), 1472–1484. <https://doi.org/10.1177/0967391120973503>
- Senapati, M., & Sahu, P. P. (2020). Meat quality assessment using Au patch electrode Ag-SnO₂/SiO₂/Si MIS capacitive gas sensor at room temperature. *Food Chemistry*, 324, 126893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126893>
- Sheibani, S., Jafarzadeh, S., Qazanfarzadeh, Z., Osadee Wijekoon, M. M. J., Mohd Rozalli, N. H., & Mohammadi Nafchi, A. (2024). Sustainable strategies for using natural extracts in smart food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 267, 131537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131537>
- Sivapragasam, N., Maqsood, S., & Rupasinghe, H. P. V. (2024). Berry bioactive compounds immobilized in starch matrix for active and intelligent packaging: A review. *Future Foods*, 10, 10-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2024.100397>
- Sohail, M., Sun, D.-W., & Zhu, Z. (2018). Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(15), 2650–2662. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1449731>
- Sørensen, K. M., Aru, V., Khakimov, B., Aunskjær, U., & Engelsen, S. B. (2018). Biogenic amines: a key freshness parameter of animal protein products in the coming circular economy. *Current Opinion in Food Science*, 22, 167–173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.05.014>
- Tavassoli, M., Sani, M. A., Khezerlou, A., Ehsani, A., Jahed-Khaniki, G., & McClements, D. J. (2022). Smart Biopolymer-Based Nanocomposite Materials Containing pH-Sensing Colorimetric Indicators for Food Freshness Monitoring. *Molecules*, 27(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/molecules27103168>
- Teodoro, K. B. R., Sanfelice, R. C., Migliorini, F. L., Pavinatto, A., Facure, M. H. M., & Correa, D. S. (2021). A Review on the Role and Performance of Cellulose Nanomaterials in Sensors. *ACS Sensors*, 6(7), 2473–2496. <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c00473>
- Vasile, C., & Baican, M. (2021). Progresses in Food Packaging, Food Quality, and Safety-Controlled-Release Antioxidant and/or Antimicrobial Packaging. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(5), 1–49. <https://doi.org/10.3390/molecules26051263>

- Wu, D., Zhang, M., Chen, H., & Bhandari, B. (2021). Freshness monitoring technology of fish products in intelligent packaging. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(8), 1279–1292. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1757615>
- Yousefi, H., Su, H.-M., Imani, S. M., Alkhalidi, K., M. Filipe, C. D., & Didar, T. F. (2019). Intelligent Food Packaging: A Review of Smart Sensing Technologies for Monitoring Food Quality. *ACS Sensors*, 4(4), 808–821. <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b00440>
- Zhai, X., Li, Z., Shi, J., Huang, X., Sun, Z., Zhang, D., Zou, X., Sun, Y., Zhang, J., Holmes, M., Gong, Y., Povey, M., & Wang, S. (2019). A colorimetric hydrogen sulfide sensor based on gellan gum-silver nanoparticles bionanocomposite for monitoring of meat spoilage in intelligent packaging. *Food Chemistry*, 290, 135–143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.138>
- Zhang, H., Jia, C., Xiao, Y., Zhang, J., Yu, J., Li, X., Hamid, N., & Sun, A. (2024). Enhanced stability and bioavailability of mulberry anthocyanins through the development of sodium caseinate-konjac glucomannan nanoparticles. *Food Chemistry*, 439, 138150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138150>