

Kemajuan Terkini dalam Kemasan Makanan Berbasis Pati Cerdas untuk Aplikasi Pangan: A Systematic Literature Review

Ayu Puspita¹, Vania Geralda², Angel Natalia Marsaulina³

^{1,2,3}Prodi Kimia, Universitas Sumatera Utara, Indonesia

ayunajem86@gmail.com¹, vaniagrld8@gmail.com², angelntalia29@gmail.com³

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima: 01-09-2026

Disetujui: 30-09-2026

Kata Kunci:

Starch-based edible film;

Smart Packaging;

Antosianin;

Bahan Pangan

Keywords:

Starch-based edible film;

Smart Packaging;

Anthocyanin;

Foodstuffs.

ABSTRAK

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perkembangan teknologi, karakteristik material, serta kinerja starch-based smart edible packaging dalam pemantauan kesegaran bahan pangan. Pencarian literatur dilakukan melalui ScienceDirect, Scopus, Google Scholar, PubMed, MDPI, dan Wiley Online Library menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) berdasarkan pedoman PRISMA 2020. Hasil kajian menunjukkan bahwa pati merupakan bahan pembentuk film yang paling banyak digunakan karena memiliki kemampuan membentuk film yang baik serta kompatibel dengan berbagai bahan fungsional. Penambahan pigmen alami, terutama antosianin, bersama senyawa aktif dan nanomaterial terbukti mampu meningkatkan sifat mekanik, aktivitas antimikroba, ketahanan terhadap uap air, serta respons perubahan warna sebagai indikator penurunan kualitas pangan. Secara keseluruhan, starch-based smart edible packaging memiliki potensi besar sebagai teknologi pengemasan berkelanjutan yang ramah lingkungan dan efektif untuk memantau kesegaran pangan secara real-time.

Abstract: This study aims to review the technological development, material characteristics, and performance of starch-based smart packaging in monitoring food freshness. A literature search was conducted via ScienceDirect, Scopus, Google Scholar, PubMed, MDPI, dan Wiley Online Library using the Systematic Literature Review (SLR) method in accordance with PRISMA 2020 guidelines. The results indicate that starch is the most widely used film-forming material due to its excellent film-forming capabilities and compatibility with various functional ingredients. The incorporation of natural pigments – particularly anthocyanins alongside active compounds and nanomaterials has been shown to enhance mechanical properties, antimicrobial activity, water vapor resistance, and color-change responses that serve as indicators of food quality deterioration. Overall, starch-based smart packaging holds significant potential as an eco-friendly and effective sustainable packaging technology for real-time food freshness monitoring.



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

A. LATAR BELAKANG

Meningkatnya penggunaan plastik selama bertahun-tahun telah menyebabkan akumulasi limbah lingkungan akibat pengelolaan yang belum optimal. Limbah kemasan plastik bahkan menyumbang hampir 50% dari total limbah plastik global (Ncube et al., 2021). Sebagai upaya mengurangi permasalahan tersebut, kemasan pangan berbasis bioplastik yang bersifat *biodegradable* terus dikembangkan sebagai alternatif pengganti plastik konvensional, meskipun masih memerlukan

pengembangan lebih lanjut agar manfaat lingkungannya semakin optimal (Kakadellis & Harris, 2020). Salah satu bahan yang banyak dimanfaatkan adalah pati, yaitu polimer alami yang berpotensi menggantikan plastik berbasis minyak bumi karena bersifat *biodegradable*, tersedia melimpah, serta mudah dimodifikasi untuk meningkatkan sifat fungsionalnya (Sadeghizadeh-Yazdi et al., 2019). Karakteristik tersebut menjadikan pati banyak digunakan sebagai bahan dasar *edible film* untuk mendukung pengembangan kemasan pangan yang lebih ramah lingkungan (Bangar et al., 2021).

Smart packaging merupakan teknologi pengemasan pangan yang mengintegrasikan active packaging dan intelligent packaging dalam satu sistem untuk meningkatkan keamanan, kualitas, serta efisiensi distribusi pangan (Bangar et al., 2021). Sementara itu, edible packaging menjadi alternatif ramah lingkungan yang memanfaatkan biopolimer dapat dikonsumsi, seperti polisakarida dan protein, untuk menghambat perpindahan gas maupun uap air guna memperlambat penurunan mutu pangan. Penggabungan teknologi *smart packaging* ke dalam matriks edible film ini melahirkan inovasi pengemasan pintar multifungsi yang tidak hanya mampu memperpanjang umur simpan produk melalui pelepasan senyawa aktif (Haddaway et al., 2022).

Penelitian terdahulu yang relevan terkait kemajuan terkini dalam kemasan makanan berbasis pati cerdas untuk aplikasi pangan Liu et al. (2022) membuktikan bahwa penambahan *plasticizer*, biopolimer lain, serta nanomaterial ke dalam matriks pati mampu meningkatkan kekuatan mekanik, sifat penghalang (*barrier*), dan stabilitas film secara signifikan. Penggunaan matriks berbasis pati ini menjadi pilihan utama karena sifatnya yang melimpah, dapat dimakan, serta mudah terurai sebagai pengemas ramah lingkungan. Selain peningkatan sifat fisik, integrasi sensor waktu, suhu, dan indikator pH ke dalam matriks biopolimer memungkinkan sistem *intelligent packaging* memantau kerusakan produk secara *real-time*. Zhao et al. (2026) menunjukkan penggunaan indikator pH alami, seperti antosianin dan kurkumin yang diintegrasikan ke dalam pati, kitosan, pektin, atau gelatin, terbukti lebih aman dibanding indikator sintetis dan efektif memantau kesegaran buah segar secara visual.

Ay et al. (2017) pengujian pada *edible film* berbasis pati singkong menunjukkan pembentukan struktur film yang homogen, transparan, fleksibel, tidak retak, serta memiliki permeabilitas uap air yang rendah. Singh et al. (2022) menjelaskan bahwa kemampuan alami pati dalam membentuk film transparan yang mampu menghambat permeasi oksigen. Meski demikian, peningkatan konsentrasi pati singkong dalam formulasi dilaporkan dapat meningkatkan daya hambat uap air, tetapi berdampak pada sifat film yang cenderung rapuh. Hundekari (2024) menyebutkan bahwa pengemasan berbasis pati ini terletak pada kekakuan dan permeabilitas uap air yang masih kalah dibanding polimer sintetis, sehingga perbaikan sifat mekanik terus dikembangkan.

Remedio & Parada Quinayá (2024) antosianin sebagai indikator alami terbukti memberikan sensitivitas tinggi terhadap perubahan pH melalui transformasi struktur kimianya yang memicu perubahan warna secara visual. Perubahan warna ini berlangsung dari merah pada kondisi asam, ungu hingga biru saat pH meningkat, serta hijau hingga kuning pada kondisi basa. Abedi-Firoozjah et al. (2022). menjelaskan bahwa warna alami seperti ubi jalar ungu, bunga telang, rosella, dan kulit delima, ekstrak kubis ungu (*Brassica oleracea*) terbukti paling efektif karena kadar antosianinnya yang tinggi serta kemampuannya memberikan respons warna yang kontras pada rentang pH yang luas. Klaric et al. (2025) penggunaan aplikasi ekstrak tumbuhan kaya antosianin dalam kemasan *biodegradable* terbukti efektif merespons perubahan keasaman dan pelepasan senyawa amonia akibat pembusukan makanan. Respons berupa perubahan warna mencolok ini memberikan peringatan dini yang akurat bagi konsumen mengenai kelayakan konsumsi produk sebelum kemasan dibuka. Santhosh et al. (2024) menawarkan potensi besar sebagai pengemas cerdas ramah lingkungan, modifikasi matriks masih diperlukan untuk mengoptimalkan ketahanan mekanik serta daya hambat uap airnya.

Kajian yang membahas secara komprehensif perkembangan *starch-based smart edible packaging* untuk pemantauan kesegaran daging melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) masih terbatas, terutama yang membandingkan jenis pati, indikator alami, karakteristik *film*, serta efektivitasnya dalam mendeteksi kesegaran daging. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi perkembangan penelitian tersebut sehingga dapat menjadi dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi kemasan pangan cerdas di masa mendatang. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji perkembangan *starch-based smart edible packaging* untuk pemantauan kesegaran bahan pangan melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Kajian difokuskan pada jenis pati yang digunakan, indikator alami, karakteristik *film*, serta kinerjanya dalam mendeteksi kesegaran bahan pangan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai perkembangan *starch-based smart edible packaging* sekaligus menjadi referensi bagi penelitian dan pengembangan kemasan pangan.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengkaji berbagai penelitian mengenai *starch-based smart edible packaging* dalam pemantauan kesegaran pangan. Proses pencarian, identifikasi, dan seleksi literatur dilakukan berdasarkan pedoman PRISMA 2020 (Azwar, 2023). Literatur diperoleh melalui beberapa basis data ilmiah, yaitu *ScienceDirect*, *Scopus*, *Google Scholar*, *PubMed*, *MDPI*, dan *Wiley Online Library*. Seluruh artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan, selanjutnya dianalisis dan disintesis sesuai dengan tujuan penelitian.

Proses pencarian literatur menghasilkan sebanyak 188 artikel ($n = 188$). Setelah dilakukan penghapusan terhadap 28 artikel duplikat ($n = 28$), sebanyak 160 artikel ($n = 160$) dilanjutkan ke tahap penyaringan berdasarkan judul, abstrak, serta kesesuaian dengan kriteria inklusi dan eksklusi. Pada tahap tersebut, sebanyak 94 artikel ($n = 94$) dieliminasi sehingga tersisa 66 artikel ($n = 66$) untuk dilakukan penilaian kelayakan. Selanjutnya, sebanyak 53 artikel ($n = 53$) dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria penelitian, sehingga diperoleh 13 artikel ($n = 13$) yang memenuhi seluruh persyaratan dan digunakan sebagai literatur dalam Systematic Literature Review ini.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Sumber Pati dan Metode Pembuatan Film

Pati merupakan biopolimer yang paling banyak digunakan dalam pengembangan smart edible packaging karena bersifat biodegradable, melimpah, relatif murah, dan mampu membentuk film dengan baik. Dalam 13 jurnal yang dianalisis, variasi sumber pati, bahan aktif, dan metode pembuatan menunjukkan bahwa performa film sangat dipengaruhi oleh komposisi matriks serta teknik pembentukannya. Oleh karena itu, karakteristik masing-masing sumber pati perlu dipahami untuk menjelaskan perbedaan sifat mekanik, sifat penghalang (barrier), dan respons sensorik film. Penelitian (Esfahani et al., 2022; Jati et al., 2024; Jiang et al., 2024; Pramitasari et al., 2022; Rahmadhia et al., 2022, 2023) menunjukkan bahwa pati singkong masih menjadi pilihan utama karena ketersediaannya tinggi, biaya relatif rendah, dan mampu menghasilkan film yang transparan serta fleksibel. Selain pati singkong, beberapa penelitian juga menggunakan pati jagung, pati ubi jalar ungu, pati kentang, pati tigernut, dan pati biji pinus Brasil. Perbedaan sumber pati tersebut berpengaruh terhadap karakteristik film yang dihasilkan. Pati jagung cenderung menghasilkan struktur film yang lebih rapat karena kandungan amilosa relatif lebih tinggi, sehingga kekuatan tariknya lebih baik. Hal ini tercermin pada penelitian Kuswandi et al. (2024) memperoleh nilai *tensile strength* sebesar 22,69 MPa pada film berbasis pati jagung yang diperkaya antosianin.

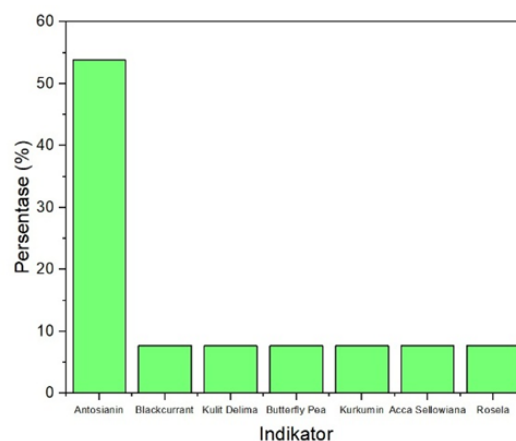
Pati kentang memiliki granula yang lebih besar dan kandungan fosfat alami yang mendukung pembentukan gel, sehingga cocok digunakan sebagai matriks film yang fleksibel dan kompatibel dengan bahan aktif seperti *butterfly pea* dan TiO_2 (Mary et al., 2020). Sementara itu, pati ubi jalar ungu memiliki keunggulan tambahan berupa pigmen alami yang dapat mendukung respons sensorik film. Penelitian Wu et al. (2025) modifikasi pati tigernut dengan enzim pullulanase meningkatkan kandungan amilosa hingga 48,80%, yang kemudian memperkuat struktur film. Temuan ini menegaskan bahwa rasio amilosa dan amilopektin merupakan faktor penting dalam menentukan performa film berbasis pati. Kandungan amilosa berperan penting dalam pembentukan jaringan film karena strukturnya yang linier memungkinkan terbentuknya ikatan hidrogen yang lebih kuat antar rantai polimer. Semakin tinggi kandungan amilosa, semakin tinggi pula *tensile strength* yang dihasilkan. Kondisi ini

menjelaskan mengapa film berbasis pati jagung dan pati tigernut termodifikasi cenderung memiliki kekuatan tarik yang lebih baik dibandingkan beberapa formulasi berbasis tapioka (Kuswandi et al., 2024).

Secara umum, hasil sintesis menunjukkan beberapa tren utama. Pertama, pati singkong masih menjadi sumber pati yang paling dominan digunakan karena ketersediaan dan biaya yang rendah. Kedua, antosianin merupakan indikator alami yang paling banyak digunakan karena sensitivitasnya terhadap perubahan pH dan kemampuannya menghasilkan perubahan warna yang jelas. Ketiga, metode casting tetap menjadi pendekatan utama dalam pembuatan film karena kemudahan aplikasinya. Keempat, sebagian besar aplikasi difokuskan pada produk pangan hewani seperti daging, ikan, udang, dan susu karena komoditas tersebut menghasilkan senyawa volatil basa yang mudah dideteksi melalui perubahan warna indikator (Jiang et al., 2024). Secara keseluruhan, perkembangan *smart edible packaging* berbasis pati menunjukkan arah yang jelas menuju sistem kemasan multifungsi yang tidak hanya berperan sebagai penghalang fisik, tetapi juga sebagai sensor kesegaran pangan. Standardisasi performa film masih perlu menjadi fokus penelitian pada masa mendatang.

2. Tren Penggunaan Indikator Alami pada *Smart Edible Packaging* Berbasis Pati

Indikator alami merupakan komponen utama dalam pengembangan *smart edible packaging* karena berfungsi sebagai sensor visual yang mampu memberikan informasi mengenai perubahan mutu dan kesegaran pangan secara *real-time*. Kemampuan tersebut diperoleh melalui respons pigmen terhadap perubahan kondisi kimia selama penyimpanan, terutama perubahan pH yang terjadi akibat aktivitas mikroorganisme dan pembentukan metabolit hasil degradasi pangan. Oleh karena itu, pemilihan jenis indikator menjadi faktor penting yang menentukan sensitivitas dan efektivitas sistem *smart edible packaging*.



Gambar 1. Distribusi Penggunaan Pigmen Alami sebagai Indikator pada Smart Edible Packaging Berbasis Pati

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, antosianin merupakan indikator alami yang paling banyak digunakan dalam pengembangan *smart edible packaging* berbasis pati. Dari 13 jurnal yang dianalisis, sebanyak 7 penelitian terdahulu menggunakan indikator berupa antosianin sebagai indikator alami utamanya, ubi jalar ungu maupun kulit buah naga merah. Sementara itu, indikator lain seperti ekstrak *black currant*, ekstrak *Acca sellowiana*, *butterfly pea extract*, *rosela*, bubuk kulit delima, dan kurkumin masing-masing ditemukan pada satu penelitian. Dominasi penggunaan antosianin menunjukkan bahwa pigmen ini masih menjadi pilihan utama dalam penelitian *smart packaging* berbasis pati karena kemampuannya menghasilkan respons warna yang jelas terhadap perubahan kondisi pangan.

Tingginya penggunaan antosianin berkaitan dengan sensitivitasnya yang tinggi terhadap perubahan pH serta kemampuannya menghasilkan rentang warna yang luas. Pada kondisi asam, antosianin umumnya berwarna merah, kemudian berubah menjadi ungu atau biru pada kondisi netral, dan hijau hingga kuning pada kondisi basa. Karakteristik tersebut memungkinkan antosianin digunakan sebagai indikator visual yang efektif untuk mendeteksi perubahan mutu berbagai produk pangan, termasuk daging, ikan, udang, susu, santan, dan jamur. Selain itu, antosianin juga tersedia melimpah dari berbagai sumber alami sehingga mudah diaplikasikan pada berbagai formulasi film berbasis pati.

Meskipun antosianin mendominasi penelitian, beberapa indikator alami lain juga menunjukkan potensi yang menjanjikan. Ekstrak *black currant* dilaporkan mampu memberikan respons terhadap perubahan pH dan senyawa volatil pada daging sapi. *Butterfly pea extract* menunjukkan perubahan warna yang jelas selama penyimpanan udang, sedangkan *rosela* dan bubuk kulit delima memiliki kemampuan sebagai indikator kesegaran sekaligus memberikan aktivitas antioksidan. Kurkumin diketahui memiliki stabilitas termal yang baik dan mampu menghasilkan perubahan warna dari kuning menjadi oranye hingga coklat pada kondisi basa. Selain itu, ekstrak *Acca sellowiana* tidak hanya berfungsi sebagai indikator warna, tetapi juga memberikan perlindungan terhadap proses foto-oksidasi karena kandungan antioksidannya.

Secara keseluruhan, hasil sintesis menunjukkan bahwa penelitian *smart edible packaging* berbasis pati masih didominasi oleh penggunaan antosianin sebagai indikator utama. Kondisi ini menunjukkan bahwa diversifikasi pigmen alami masih relatif terbatas dan menjadi peluang penelitian yang penting untuk dikembangkan di masa mendatang. Eksplorasi pigmen alami lain yang memiliki stabilitas lebih baik terhadap cahaya, suhu, dan oksidasi berpotensi meningkatkan performa sensorik, memperpanjang umur simpan indikator, serta memperluas aplikasi *smart edible packaging* pada berbagai jenis dari produk pangan.

3. Aplikasi Smart Edible Packaging pada Berbagai Produk Pangan

Smart edible packaging berbasis pati telah diaplikasikan pada berbagai jenis produk pangan untuk memantau perubahan mutu dan kesegaran secara real-time. Berdasarkan hasil sintesis yang disajikan pada Tabel 1, aplikasi teknologi ini mencakup produk daging, perikanan, susu dan santan, serta beberapa produk nabati. Keberagaman aplikasi tersebut menunjukkan bahwa smart edible packaging memiliki potensi yang luas sebagai sistem pemantauan mutu pangan yang aman, ramah lingkungan, dan mudah digunakan oleh konsumen.

Tabel 1. Sintesis Aplikasi Smart Edible Packaging Berbasis Pati pada Berbagai Kelompok Produk Pangan

Kelompok Pangan	Jumlah Jurnal	Produk Pangan	Parameter yang Dipantau	Indikator yang Digunakan	Temuan Utama
Daging	5	Daging sapi, daging ayam, daging domba	pH, NH ₃ , TVB-N	Antosianin, black currant, rosela, bubuk kulit delima, kurkumin	Efektif mendeteksi pembusukan melalui perubahan warna yang berkorelasi dengan peningkatan senyawa basa volatil
Perikanan	3	Ikan, udang, udang putih	pH, perubahan warna	Antosianin, <i>butterfly pea extract</i>	Mampu memantau kesegaran produk melalui perubahan warna yang jelas selama penyimpanan
Susu dan Santan	3	Susu segar, susu pasteurisasi, santan	pH, RGB, perubahan warna	Antosianin	Efektif mendeteksi perubahan mutu akibat aktivitas mikroba pada produk cair
Produk Nabati	1	Jamur tiram putih	pH, perubahan warna	Antosianin	Mampu mendeteksi kerusakan produk secara visual selama penyimpanan

Pangan Mudah Rusak Lainnya	1	<i>Perishable food</i>	Perubahan warna, aktivitas antioksidan	<i>Acca sellowiana</i>	Berfungsi sebagai indikator mutu sekaligus memberikan perlindungan antioksidan
Total	13	-	-	-	-

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, aplikasi *smart edible packaging* berbasis pati telah diuji pada berbagai komoditas pangan, terutama daging, ikan, udang, susu, santan, dan jamur. Keberagaman aplikasi ini menunjukkan bahwa teknologi tersebut memiliki potensi luas sebagai sistem pemantauan mutu pangan secara *real-time*. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada produk hewani karena komoditas ini lebih cepat mengalami kerusakan dan menghasilkan perubahan kimia yang mudah dideteksi oleh indikator warna. Produk pangan hewani merupakan kelompok aplikasi yang paling dominan. Pada daging sapi, (Jiang et al., 2024) menunjukkan bahwa film berbasis pati singkong dengan ekstrak black currant mampu memantau peningkatan NH_3 dan pH hingga 60 jam penyimpanan. Pada daging domba, (Esfahani et al., 2022) melaporkan bahwa film berbasis pati singkong dengan bubuk kulit delima efektif memantau perubahan TVB-N dan pH. Sementara itu, antosianin dan rosela pada film berbasis pati mampu memberikan respons warna yang berkorelasi dengan pembusukan daging ayam. Hasil ini menegaskan bahwa indikator alami sangat sensitif terhadap perubahan kimia yang terjadi selama degradasi protein. Pada produk perikanan, respons indikator juga terlihat sangat jelas. (Rahmadhia et al., 2022) melaporkan bahwa film berbasis tapioka dengan antosianin ubi jalar ungu mampu mendeteksi perubahan pH pada ikan melalui perubahan warna yang mudah diamati. Hasil serupa ditunjukkan oleh (Pramitasari et al., 2022) pada udang, yang memperlihatkan bahwa perubahan warna indikator berkorelasi dengan penurunan kesegaran selama penyimpanan. Tingginya laju pembentukan senyawa volatil pada ikan dan udang menjadikan produk ini sangat sesuai untuk aplikasi *smart edible packaging*. Aplikasi pada produk nabati masih relatif terbatas.

Dari seluruh parameter yang dianalisis, pH dan TVB-N merupakan indikator yang paling sering digunakan untuk menilai efektivitas sistem. Pada produk daging dan perikanan, peningkatan TVB-N mencerminkan degradasi protein dan aktivitas mikroba yang semakin tinggi, sedangkan pada susu dan santan, perubahan pH lebih banyak dipengaruhi oleh proses fermentasi mikroba. Karena pigmen alami seperti antosianin, kurkumin, rosela, dan ekstrak *black currant* sangat sensitif terhadap perubahan pH, maka perubahan warna yang dihasilkan dapat digunakan sebagai representasi visual dari tingkat kesegaran pangan. Secara keseluruhan, hasil sintesis pada Tabel 1, menunjukkan bahwa *smart edible packaging* berbasis pati memiliki efektivitas tinggi dalam memantau mutu berbagai produk pangan. Aplikasi yang

paling menjanjikan terdapat pada produk daging dan perikanan karena menghasilkan hubungan yang kuat antara perubahan warna indikator, pH, TVB-N, dan aktivitas mikroba. Meskipun demikian, penelitian pada produk nabati masih perlu diperluas agar potensi teknologi ini dapat dimanfaatkan secara lebih luas. Dengan sifatnya yang biodegradable, aman, dan ramah lingkungan, *smart edible packaging* berpeluang menjadi salah satu inovasi penting dalam sistem kemasan pangan masa depan. Studi penerimaan konsumen juga perlu dilakukan untuk mendukung implementasi teknologi ini secara lebih luas dalam industri pangan.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil *Systematic Literature Review*, teknologi *starch-based smart edible packaging* khususnya yang memanfaatkan matriks pati singkong atau tapioka menunjukkan potensi besar sebagai alternatif kemasan pangan cerdas yang ramah lingkungan untuk memantau kesegaran daging secara *real-time*. Integrasi pigmen alami antosianin sebagai indikator visual sensitif pH yang dikombinasikan dengan bahan fungsional seperti *active agents*, minyak atsiri, nanomaterial, dan *filler* terbukti mampu meningkatkan sifat mekanik, ketahanan terhadap uap air, serta aktivitas antimikroba. Secara keseluruhan, sistem kemasan ini tidak hanya efektif mempertahankan mutu dan memperpanjang masa simpan produk, tetapi juga menjadi solusi strategis dalam memperkuat keamanan pangan sekaligus mengurangi ketergantungan pada kemasan plastik konvensional.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk memfokuskan pengembangan formulasi *starch-based smart edible packaging* menggunakan berbagai sumber pati lokal Indonesia guna mengeksplorasi karakteristik unik yang dapat mengoptimalkan performa film. Selain itu, optimasi kombinasi pigmen alami, bahan aktif, dan *filler* ramah lingkungan perlu diperdalam untuk meningkatkan stabilitas serta sensitivitas warna indikator. Penerapan teknologi ini pada skala industri juga membutuhkan studi lanjutan yang mencakup evaluasi penyimpanan dalam kondisi nyata, uji migrasi (*migration test*), analisis teknoekonomi, hingga penilaian tingkat penerimaan konsumen agar dapat diimplementasikan secara luas di industri pangan.

REFERENSI

- Abedi-Firoozjah, R., Yousefi, S., Heydari, M., Seyedfatehi, F., Jafarzadeh, S., Mohammadi, R., Rouhi, M., & Garavand, F. (2022). Application of Red Cabbage Anthocyanins as pH-Sensitive Pigments in Smart Food Packaging and Sensors. *Polymers*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/polym14081629>
- AY, D., N, C., TF, A., DA, C., AN, G., & S, M. (2017). Water Vapor Permeability of Edible Films Based on Improved Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Native Starches. *Journal of Food Processing & Technology*, 08(03). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000665>
- Azwar, W. (2023). Pembentukan Karakter Moral Peserta Didik melalui Pendekatan Habitiasi. *Seminar Nasional Paedagogia*, Vol. 3, 50–58.

- Bangar, S. P., Purewal, S. S., Trif, M., Maqsood, S., Kumar, M., Manjunatha, V., & Rusu, A. V. (2021). Functionality and applicability of starch-based films: An eco-friendly approach. *Foods*, 10(9), 1–24. <https://doi.org/10.3390/foods10092181>
- Esfahani, A., Mohammadi Nafchi, A., Baghaei, H., & Nouri, L. (2022). Fabrication and characterization of a smart film based on cassava starch and pomegranate peel powder for monitoring lamb meat freshness. *Food Science and Nutrition*, 10(10), 3293–3301.
- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). *PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020 - compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis*. 1–12. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>
- Hundekari, S. N. (2024). Development of Edible Film from Cassava Starch and its Physico-mechanical Properties. *International Journal of Food and Fermentation Technology*, 14(2), 539–547. <https://doi.org/10.30954/2277-9396.02.2024.6>
- Jati, I. R. A. P., Elaine, J., Setijawaty, E., & Utomo, A. R. (2024). Development of Bio-Based Smart Edible Food Packaging Using Roselle Flower Extract and Eggshell Powder as Active Agents. *BIO Web of Conferences*, 98, 1–12. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249805001>
- Jiang, C., Yang, H., Liu, T., Zhang, Q., Zou, Y., & Wang, S. (2024). Fabrication, characterization and evaluation of Manihot esculenta starch based intelligent packaging films containing gum ghatti and black currant (*Ribes nigrum*) extract for freshness monitoring of beef meat. *Food Chemistry: X*, 23(June), 101616. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101616>
- Kakadellis, S., & Harris, Z. M. (2020). Don't scrap the waste: The need for broader system boundaries in bioplastic food packaging life-cycle assessment – A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122831. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122831>
- Klaric, S. V., Galvão Maciel, A., Arend, G. D., Tres, M. V., de Lima, M., & Soares, L. S. (2025). Application of Plant Extracts Rich in Anthocyanins in the Development of Intelligent Biodegradable Packaging: An Overview. *Processes*, 13(1), 191. <https://doi.org/10.3390/pr13010191>
- Kuswandi, B., Seftyani, M., & Pratoko, D. K. (2024). Edible colorimetric label based on immobilized purple sweet potato anthocyanins onto edible film for packaged mushrooms freshness monitoring. *Journal of Food Science and Technology*, 61(9), 1811–1822. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-05960-y>
- Liu, D., Zhao, P., Chen, J., Yan, Y., & Wu, Z. (2022). Recent Advances and Applications in Starch for Intelligent Active Food Packaging: A Review. *Foods*, 11(18), 2879. <https://doi.org/10.3390/foods11182879>
- Mary, S. K., Koshy, R. R., Daniel, J., Koshy, J. T., Pothen, L. A., & Thomas, S. (2020). Development of starch based intelligent films by incorporating anthocyanins of butterfly pea flower and TiO₂ and their applicability as freshness sensors for prawns during storage. *RSC Advances*, 10(65), 39822–39830. <https://doi.org/10.1039/D0RA05986B>
- Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. (2021). An overview of plasticwaste generation and management in food packaging industries. *Recycling*, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>
- Pramitasari, R., Gunawicahya, L. N., & Anugrah, D. S. B. (2022). Development of an Indicator Film Based on Cassava Starch–Chitosan Incorporated with Red Dragon Fruit Peel

- Anthocyanin Extract. *Polymers*, 14(19), 4142. <https://doi.org/10.3390/polym14194142>
- Rahmadhia, S. N., Saputra, Y. A., Juwitaningtyas, T., & Rahayu, W. M. (2022). Intelligent Packaging as a pH-Indicator Based on Cassava Starch with Addition of Purple Sweet Potato Extract (*Ipomoea batatas* L.). *Journal of Functional Food and Nutraceutical*, 4(1), 37–47. <https://doi.org/10.33555/jffn.v4i1.90>
- Rahmadhia, S. N., Sidqi, A. A., & Saputra, Y. A. (2023). Physical Properties of Tapioca Starch-Based Film Indicators with Anthocyanin Extract from Purple Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) and Response to pH Changes. *Sains Malaysiana*, 52(6), 1685–1697. <https://doi.org/10.17576/jsm-2023-5206-06>
- Remedio, L. N., & Parada Quinayá, C. (2024). Intelligent Packaging Systems with Anthocyanin: Influence of Different Polymers and Storage Conditions. *Polymers*, 16(20), 2886. <https://doi.org/10.3390/polym16202886>
- Sadeghizadeh-Yazdi, J., Habibi, M., Kamali, A. A., & Banaei, M. (2019). Aplicación de películas a base de almidón comestibles y biodegradables en el envasado de alimentos: revisión sistemática y metanálisis. *Investigación Actual En Nutrición y Ciencia de Los Alimentos*, 7(3), 624–637.
- Santhosh, R., Ahmed, J., Thakur, R., & Sarkar, P. (2024). Starch-based edible packaging: rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties – a review. *Sustainable Food Technology*, 2(2), 307–330. <https://doi.org/10.1039/D3FB00211J>
- Singh, G. P., Bangar, S. P., Yang, T., Trif, M., Kumar, V., & Kumar, D. (2022). Effect on the Properties of Edible Starch-Based Films by the Incorporation of Additives: A Review. *Polymers*, 14(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/polym14101987>
- Wu, X., Zhang, J., Gong, X., Hu, X., Zhang, X., Zhang, B., & Zhang, Q. (2025). A smart composite film derived from high amylose tigernut starch: Integrating antimicrobial and pH-indicating properties for beef preservation applications. *Food Chemistry: X*, 28(January), 102552. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102552>
- Zhao, T., Wang, L., Wang, X., Zhang, M., Zhang, X., Li, C., Zhang, Q., Zhao, Y., & Wang, L. (2026). Natural pH-Sensitive Intelligent Edible Gel-Based Packaging: From Structural Design to Fruit Freshness Monitoring. *Gels*, 12(2), 169. <https://doi.org/10.3390/gels12020169>