



Pendekatan Ontologis Dalam *Smart Packaging* Berbasis Limbah Agro

An Ontological Approach to Smart Packaging Based on Agricultural Waste

Hanifah Ayu^{1,2*}, M Sarjan³⁾

¹⁾Doctoral Program in Sustainable Agriculture, University of Mataram, Jl. Majapahit No.62
Gomong, Mataram 83115, West Nusa Tenggara, Indonesia, Email:
doktorpertanian@unram.ac.id, Telp: (0370) 6465062

²⁾Faculty of Food Technology and Agroindustry, University of Mataram, Jl. Majapahit No.62
Gomong, Mataram 83115, West Nusa Tenggara, Indonesia, Email: ftpa@unram.ac.id, Telp: (0370)
646506

³⁾ Faculty of Agriculture, University of Mataram, Jl. Majapahit No.62 Gomong, Mataram 83115,
West Nusa Tenggara, Indonesia, Email: faperta@unram.ac.id, Telp: (0370) 646506

*Corresponding Author: hanifahayu@unram.ac.id

How to Cite :

Ayu, H., M. Sarjan (2026). Pendekatan Ontologis Dalam *Smart Packaging* Berbasis Limbah Agro. *SINTA Journal: Science, Technology and Agriculture Journal*, 7(1), 43–76. <https://doi.org/10.37638/sinta.7.1.43-76>

ABSTRAK

Kemasan pangan bertransisi dari fungsi protektif pasif menuju sistem cerdas (*smart packaging*) yang mampu memantau, merespons, dan menyampaikan kondisi pangan secara realtime. Dominasi plastik berbasis minyak bumi dalam industri kemasan menimbulkan dampak lingkungan dan kesehatan yang serius, sehingga memicu pencarian material alternatif yang lebih berkelanjutan. Kajian ini menggunakan pendekatan ontologis untuk mendefinisikan limbah agro sebagai sumber daya esensial yang kaya biopolimer dan senyawa bioaktif yang menjadikannya bahan baku strategis untuk *smart packaging*. Secara fungsional dan berkelanjutan, material ini diolah menjadi komponen kemasan aktif (antioksidan, antimikroba) dan cerdas (sensor/indikator) yang efektif memperpanjang umur simpan, mengurangi food waste dan food loss. Dari perspektif keberlanjutan, integrasi *smart packaging* berbasis

ARTICLE HISTORY

Received [21 December 20265

Revised [21 January 2026]

Accepted [10 February 2026]

KEYWORDS

Limbah Agro

Ontologis

Smart Packaging

Sustainable

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



limbah agro sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular karena mengonversi residu organik bernilai rendah menjadi produk kemasan bernilai tambah tinggi dan mendukung pencapaian SDGs terkait konsumsi produksi berkelanjutan. Secara keseluruhan, pendekatan ontologis memberikan kerangka kerja untuk mengubah perspektif limbah, memvalidasi performa material, dan mengarahkan strategi riset untuk mengatasi hambatan teknis dan regulasi, demi mewujudkan implementasi smart packaging berbasis limbah agro di industri pangan.

ABSTRACT

Food packaging is transitioning from a passive protective function to an intelligent system (smart packaging) capable of integrating, responding to, and communicating food conditions in real time. The dominance of petroleum based plastics in the packaging industry has serious environmental and health impacts, triggering the search for more sustainable alternative materials. This study uses an ontological approach to define agro-waste as an essential resource rich in biopolymers and bioactive compounds, making it a strategic raw material for smart packaging. Functionally and sustainably, this material is processed into active (antioxidant, antimicrobial) and intelligent (sensor/indicator) packaging components that effectively extend shelf life, reduce food waste and food loss. From a stakeholder perspective, the integration of agro waste based smart packaging aligns with circular economy principles as it transforms low value organic residues into high value packaging products and supports the achievement of the SDGs related to sustainable consumption. Overall, the ontological approach provides a framework for shifting the perspective of waste, validating material performance, and guiding research strategies to overcome technical and regulatory barriers, in order to realize the implementation of agro waste based smart packaging in the food industry.

PENDAHULUAN

Kemasan pangan memiliki peran penting dalam melindungi, mengawetkan, serta menyajikan makanan agar dapat didistribusikan, dipasarkan, dan dikonsumsi. Fungsi utamanya meliputi pencegahan kontaminasi, pembusukan, dan berbagai pengaruh dari kondisi lingkungan luar yang dapat menurunkan kualitas dari makanan tersebut. Bahan kemasan membantu menjaga makanan dari paparan udara dan mikroorganisme sehingga umur simpan dapat diperpanjang. Begitu pula dalam pemilihan bahan kemasan, teknologi, dan metode pengemasan perlu

disesuaikan dengan sifat dan jenis makanan agar produk tetap memiliki kualitas yang baik serta aman untuk dikonsumsi oleh konsumen.

Fungsi dasar pada pengemasan tradisional yaitu sebagai perlindungan (*protection*), komunikasi (*communication*), kenyamanan (*convenience*), dan fungsi wadah (*containment*) (Vanderroost et al., 2014). Pemahaman secara umum kemasan sering dianggap sebagai kegiatan membungkus produk dengan bahan seperti kertas, plastik, aluminium foil, aneka jenis daun, pelepah, atau kulit hewan dan sebagainya. Padahal pengemasan sebenarnya jauh lebih luas tidak hanya terbatas pada proses membungkus, tetapi juga mencakup penggunaan wadah, botol, kaleng, kotak kemasan, edible coating dan lain lainnya.

Seiring perkembangan zaman nilai fungsional kemasan tradisional mulai bertambah dan perannya dalam strategi pemasaran kini diakui sebagai faktor penting dalam persaingan pasar. Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa kemasan tidak hanya berfungsi melindungi, tetapi juga secara aktif membantu memperpanjang umur simpan, menjaga mutu, dan memastikan keamanan pangan guna mengurangi terjadinya pemborosan makanan (Duda Chodak, et al 2023). Perubahan fungsi kemasan menjadi dasar bagi transformasi dari konsep pengemasan tradisional menuju pengemasan yang inovatif. Pada pengemasan tradisional, pemilihan bahan dan teknik pengemasan difokuskan untuk memenuhi empat fungsi utama. Transformasi dari perkembangan jenis kemasan disesuaikan dengan meningkatnya tuntutan konsumen terhadap mutu, keamanan, dan kemampuan memonitoring pangan yang akan dikonsumsi. Selain itu, diperlukan pendekatan yang efektif dan efisien untuk memenuhi kebutuhan bisnis, dengan tetap menjaga kualitas makanan sepanjang rantai pasok serta meminimalkan kerugian pangan (*food loss*) dan maupun limbah makanan (*food waste*).

Salah satu bentuk kemasan modern dan inovatif yang saat ini banyak diterapkan adalah *smart packaging* (kemasan cerdas). *Smart packaging* adalah jenis kemasan inovatif yang tidak hanya melindungi produk, tetapi juga mampu memantau kondisi makanan dan memberikan respons terhadap perubahan lingkungan atau kualitas produk. Kajian yang telah dilakukan oleh Vanderroost et al., (2014), *smart packaging* menggabungkan konsep *intelligent* dan *active packaging*, di mana kemasan mampu memantau perubahan internal maupun eksternal pada produk (*intelligent*) dan memberikan respons lebih lanjut (*active*) disampaikan melalui media elektrik maupun optik. Kemasan aktif (*active packaging*) berperan dalam memperpanjang umur simpan serta meningkatkan keamanan dan kualitas pangan dengan cara memperlambat pematangan atau menghambat pertumbuhan mikroorganisme, sedangkan *intelligent packaging* menyediakan informasi *real time* mengenai kondisi produk kepada konsumen. Kemasan pintar (*smart packaging*) memanfaatkan sensor kimia maupun biosensor untuk memantau mutu dan keamanan makanan sepanjang rantai pasok, dari produsen hingga konsumen (Rodrigues et al., 2021). Kombinasi *intelligent* dan *active packaging* merupakan kombinasi sistem pengemasan yang memberikan pengaruh sinergisme secara

fungsi pada smart packaging (Achmadi, 2023). *Smart packaging* memiliki tujuan fundamental untuk meningkatkan kualitas, mempertahankan kesegaran, menyampaikan informasi mutu kepada konsumen, keamanan dan masa simpan produk pangan, sehingga berkontribusi signifikan terhadap rantai pasokan dalam mempermudah pengawasan selama distribusi dalam rantai pasok. Selain itu kemasan pintar memiliki potensi besar untuk meningkatkan keamanan pangan serta mengurangi kerugian pangan (*food loss*) dan maupun limbah makanan (*food waste*) (Ganeson et al., 2023). Hal ini dimungkinkan karena kemasan pintar dapat memantau kondisi aktual produk selama penyimpanan dan distribusi kondisi yang seringkali tidak bisa terwakili hanya melalui tanggal kedaluwarsa.

Abad ke-20 menjadi era kejayaan plastik, yang mendominasi industri kemasan dengan menawarkan tingkat kenyamanan yang belum pernah ada sebelumnya. Plastik berasal dari minyak bumi telah menjadi material dominan dalam sektor kemasan makanan, bahkan menjadi identitas bagi pengembangan teknologi kemasan. Meskipun demikian, penggunaan plastik konvensional ini menimbulkan kekhawatiran serius karena dampaknya terhadap lingkungan, seperti polusi yang merusak, serta risiko bagi kesehatan manusia. Menurut lembaga internasional dan pemerintah dunia UNEP (*United Nations Environment Programme*) dan IOC-UNESCO (*Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO*) mengenai sampah plastik di lautan dan temuan mikroplastik dalam rantai makanan telah menyentuh kesadaran kolektif. Selain itu, ditemukannya mikroplastik dalam aliran darah manusia serta hadirnya zat aditif yang bersifat karsinogenik yang menjadikan transisi ini sangat penting, terutama untuk produk pangan yang mudah rusak (Goswami et al., 2024). Situasi ini memicu kebutuhan mendesak untuk mencari bahan pengemasan alternatif yang lebih ramah lingkungan, dengan solusi berbasis nabati muncul sebagai pilihan yang sangat signifikan (Teixeira Costa dan Andrade, 2021).

Seiring pendalaman kajian tentang kemasan berkelanjutan maka semakin terlihat bahwa integrasi penerapan teknologi kemasan pangan cerdas (*smart packaging*) pada material ramah lingkungan memberikan banyak nilai tambah (Baneshi, et al 2024). Selain berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan dan menurunkan potensi risiko kesehatan yang berkaitan dengan penggunaan plastik berbasis minyak bumi, kemasan pintar berbasis biomaterial yang juga membuka peluang untuk inovasi produk dan keunggulan kompetitif di pasar. Pemanfaatan teknologi kemasan cerdas seperti sensor dan analitik data berpotensi mengubah tidak hanya mempertahankan kualitas tetapi dapat meminimalkan kerusakan selama proses penyimpanan dan pendistribusian, serta cara bagaimana konsumen berinteraksi dengan kemasan berbahan dasar material alami.

Upaya menemukan solusi inovatif mendorong pemanfaatan limbah agroindustri dan berbagai produk sampingannya yang mengandung beragam senyawa bermanfaat agar sebagai material alami dari kemasan cerdas. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku kemasan pangan merupakan

salah satu pendekatan strategis dalam mewujudkan sistem pangan yang lebih berkelanjutan. Produksi limbah agroindustri dalam jumlah besar seperti kulit buah, jerami, sekam padi, ampas tebu, dan residu hortikultura menyebabkan tekanan lingkungan yang signifikan apabila tidak dikelola secara optimal. Dalam konteks ini, transformasi limbah pertanian menjadi biopolimer atau material fungsional menawarkan peluang untuk mengurangi ketergantungan pada plastik berbasis minyak bumi sekaligus menekan volume limbah organik (Varghese et al., 2023; Carnaval et al., 2024).

Selain itu pengembangan kemasan cerdas (*smart packaging*) berbasis biomassa atau bahan alami semakin mendapat perhatian karena kemampuannya dalam memantau kondisi pangan melalui sensor kimia, biosensor atau indikator perubahan kualitas secara *real time*. Material biopolimer yang berasal dari limbah pertanian umumnya mengandung senyawa bioaktif seperti antioksidan, pigmen alami, dan komponen antimikroba yang dapat diintegrasikan untuk menghasilkan kemasan aktif maupun cerdas (Osmólska et al., 2022; Said Nurul Saadah & Won Young Lee, 2025). Integrasi komponen tersebut memungkinkan peningkatan umur simpan, keamanan, serta sebagai kemampuan melacak asal dan kondisi makanan tanpa penggunaan bahan tambahan kimia buatan. Solusi kemasan cerdas seperti kemasan vakum dan bahan *biodegradable* berbasis biopolimer memungkinkan pengawetan produk secara alami, menjaga kualitas selama distribusi tanpa memerlukan aditif sintetis. Oleh karena itu, kajian ini secara komprehensif bertujuan untuk secara ontologis bagaimana memahami dan menetapkan hakikat esensial limbah pertanian sebagai material berkualitas tinggi yang dapat menggantikan kemasan konvensional menjadi kemasan cerdas serta memiliki keunggulan lainnya secara fungsionalnya.

METODE PENELITIAN

Metode

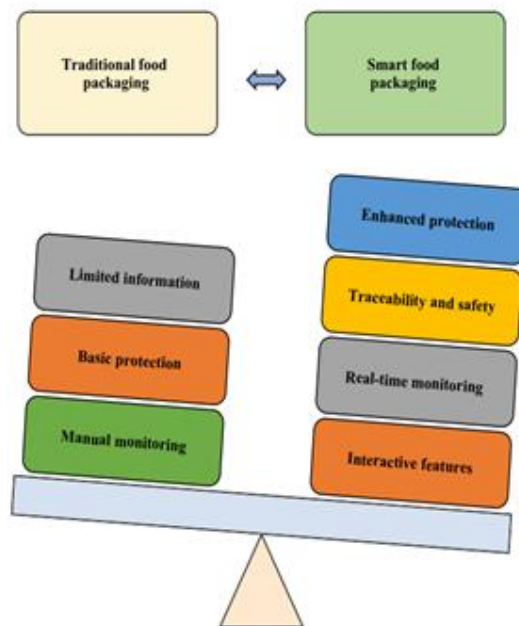
Kajian ini dilaksanakan dengan menggunakan pendekatan bersifat deskriptif kualitatif dengan jenis penelitian berupa library research atau studi kepustakaan. Prosedur pengumpulan datanya melibatkan penelusuran, pengumpulan, dan rekonstruksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep Kemasan Tradisional Menuju Kemasan Cerdas

Kemasan pangan tradisional telah lama dipahami sebagai sistem pasif yang terutama berfungsi sebagai pelindung fisik dan kimia terhadap produk menjaga agar makanan terlindungi dari kontaminasi, oksidasi, kelembapan, atau kerusakan mekanis selama penyimpanan dan distribusi (De Paola et al., 2022; Moustafa et al., 2019). Dengan demikian, pengemasan tradisional cenderung memiliki karakteristik pasif hanya berfokus pada perlindungan dasar dan keamanan pada material penyusun pengemas tradisional dapat dipastikan dengan memilih material yang

bersifat inert pada saat kontak langsung dengan produk (Vasuki et al.,2023). Namun seiring perkembangan zaman menunjukkan pergeseran paradigma tersebut di mana pengemasan dikembangkan tidak sekadar sebagai pelindung generik, tetapi juga memiliki fungsi tambahan yang bersifat interaktif dan dapat berkomunikasi dengan konsumen. Meningkatnya perhatian konsumen terhadap keamanan pangan dan kesegaran produk mendorong pengemasan untuk memantau dan menyampaikan status produk secara lebih efektif. Tantangan utama kemasan saat ini adalah bagaimana memperpanjang umur simpan pangan dengan mengendalikan berbagai fenomena, termasuk perubahan kimia, aktivitas mikroba, reaksi enzimatik, interaksi kimia fisika dan kerusakan mekanis. Sehingga konsep kemasan tersebut dapat membantu para konsumen dan distrutor dalam mendayagunakan manfaat tambahan dan fungsional dari kemasan tersebut secara maksimal.



Gambar 1. Kemasan makanan tradisional vs Kemasan makanan pintar
(Bhatlawande et al., 2024)

Perubahan dari konsep pengemasan tradisional menuju pengemasan yang inovatif menandai pergeseran dari fungsi protektif pasif menuju sistem kemasan yang lebih aktif dan interaktif, yang tidak hanya melindungi produk tetapi juga mampu memantau kualitas, memperpanjang umur simpan, serta memberikan informasi real time kepada konsumen mengenai kesegaran dan keamanan pangan (Gambar 1). Kemasan yang inovatif digunakan adalah kemasan cerdas (*smart packaging*), di mana konsep ini dirancang untuk menciptakan interaksi yang menguntungkan antara lingkungan pengemas dan makanan, guna memberikan perlindungan yang aktif dan dinamis terhadap degradasi produk (Ganeson et al.,

2023). Kemasan cerdas tidak hanya meningkatkan kualitas pangan, tetapi juga berperan penting dalam memenuhi persyaratan regulasi keamanan pangan yang semakin ketat, baik di tingkat nasional maupun internasional. Kemasan inovatif ini juga menawarkan lapisan perlindungan tambahan terhadap potensi ancaman seperti keamanan melalui kemampuan deteksi, indikasi kerusakan, dan pemantauan kondisi pangan sehingga dapat mengurangi risiko tersebut (Siciliano et al., 2024). Perbedaan mendasar antara kedua jenis kemasan ini dapat diilustrasikan melalui perbandingan yang terstruktur pada tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan antara kemasan Tradisional dan kemasan Cerdas

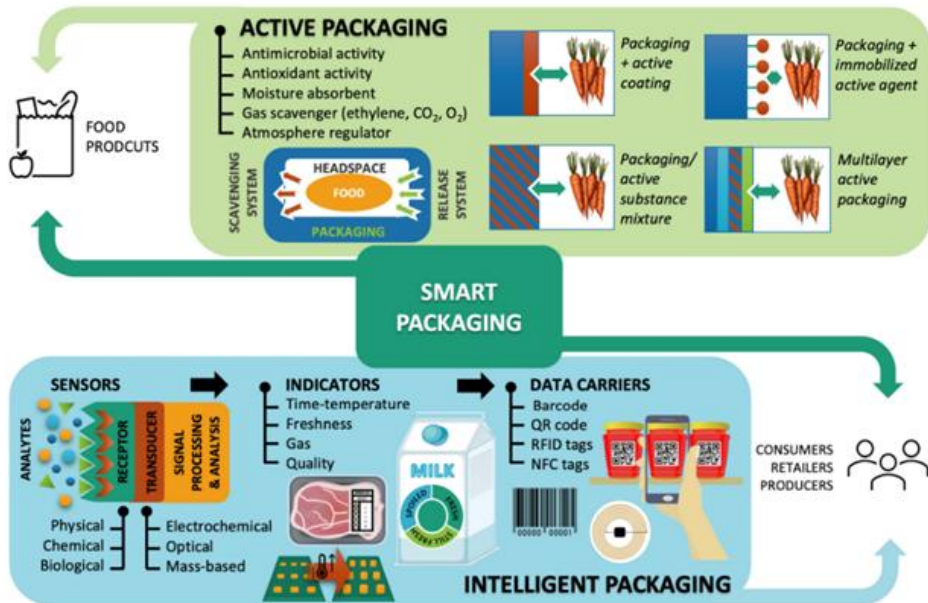
Parameter	Kemasan Tradisional (Konvensional)	Kemasan Cerdas (Smart Packaging)	Sumber Pendukung
Konsep dan Fungsi Utama	<p>Pasif dan Protektif Inert. Fungsinya adalah melindungi makanan dari kontaminasi eksternal. Materialnya dipilih berdasarkan sifatnya yang inert (tidak reaktif) saat kontak langsung dengan produk.</p>	<p>Aktif, Responsif, dan Interaktif. Melampaui efek penghalang; kemasan harus bertindak langsung pada makanan dan ruang sekitarnya. Tujuannya adalah memperpanjang masa simpan, memantau kesegaran, dan meningkatkan keamanan.</p>	(Drago et al., 2020)
Pengguna	<p>Memberikan label yang jelas agar konsumen memperoleh informasi yang diperlukan, sekaligus menghadirkan kemudahan penggunaan seperti penutup yang mudah dibuka tutup serta fitur</p>	<p>-Mengoptimalkan kepercayaan konsumen bahwa kemasan mampu menjalankan perannya dalam menjaga mutu, kesegaran, dan keamanan pangan, dengan penggunaan aditif atau bahan pengawet yang</p>	Muñiz et al.,2021

	penyajian yang praktis dan sesuai porsi	minimal atau bahkan tanpa tambahan sama sekali. -Mendorong rasa aman konsumen dalam mencegah pemborosan makanan, mengurangi risiko keracunan, serta meminimalkan potensi terjadinya alergi.	
Pemasaran dan distribusi	-Memperlancar proses distribusi. - Menjamin pemasaran yang efektif dengan harga yang wajar, kelayakan teknis, aman untuk kontak langsung dengan makanan, tahan terhadap tekanan lingkungan rendah (suhu dan kondisi), serta mendukung daur ulang atau penggunaan ulang	Melayani konsumen yang semakin tinggi terhadap pengemasan berkelanjutan, di mana pemilihan sumber bahan, pengembangan, dan penggunaan kemasan dirancang sebagai solusi untuk mengurangi jejak ekologis dan dampak negatif terhadap lingkungan.	Muñiz et al.,2021

Prinsip kemasan cerdas (*Smart Packaging*)

Permintaan konsumen terhadap makanan yang lebih segar, sehat, dan tahan lama mendorong berkembangnya inovasi pada desain kemasan. Saat ini, telah dikembangkan jenis kemasan cerdas yang mampu mendeteksi kondisi makanan dan menyampaikan informasi terkait kualitas produk secara real time. Sebelum membahas lebih lanjut, penting untuk membedakan tiga istilah yang sering digunakan secara bergantian, yaitu kemasan aktif (*active packaging*), kemasan pintar (*intelligent packaging*) dan kemasan cerdas (*smart packaging*) (Gambar 2).Kemasan aktif mengandung bahan yang dirancang untuk berinteraksi dengan makanan atau lingkungan sekitarnya, sehingga dapat memodifikasi komposisi atau karakteristik makanan. Tujuannya adalah mempertahankan sifat sensorik dan organoleptik

produk agar kualitasnya tetap terjaga lebih lama. Bahan aktif yang umum digunakan meliputi senyawa antimikroba, antioksidan, pengikat gas atau aroma, serta penghambat cahaya (Amin et al., 2022).



Gambar 2. Klasifikasi kemasan aktif, cerdas, dan pintar berdasarkan sifat, aplikasi, interaksi, dan beberapa aplikasinya (Versino et al., 2023)

Di sisi lain, kemasan pintar dirancang untuk mendeteksi perubahan yang terjadi di dalam kemasan makanan dan menyampaikan informasi mengenai kondisi produk tersebut (Cheng et al., 2022). Walaupun fungsinya masih terbatas pada pendeteksian dan komunikasi, kemasan pintar dapat meningkatkan aspek keamanan, keselamatan, dan kenyamanan konsumen dengan memberikan data kuantitatif secara real time terkait integritas kemasan serta tingkat kesegaran, kematangan, atau adanya kontaminasi pada makanan (Amin et al., 2022; Bibi et al., 2017). Pada akhirnya, kemasan pintar sering kali merupakan hasil integrasi antara teknologi kemasan aktif dan cerdas, meskipun istilah ini terkadang digunakan secara tumpang tindih untuk salah satu jenis saja (Jamróz et al., 2019). Meskipun demikian, sistem kemasan yang hanya memiliki satu fungsi tapi bisa menjaga kesegaran atau sekadar memantau kondisi makanan, mungkin belum mampu memenuhi seluruh kebutuhan praktis dalam pengemasan makanan.

Kemasan Aktif (Active packaging)

Active packaging (kemasan aktif) merujuk pada sistem pengemasan pangan di mana kemasan itu tidak sekadar sebagai pelindung pasif, melainkan secara sengaja dilengkapi dengan komponen tambahan yang memungkinkan interaksi antara kemasan, produk dan lingkungan di dalam atau sekitar kemasan. Tujuan

utamanya adalah untuk mempertahankan atau memperpanjang kualitas, keamanan, dan umur simpan (*shelf life*) produk makanan meningkatkan keamanan, atau memperbaiki sifat sensoris makanan sehingga kualitasnya tetap terjaga. Komponen aktif ini dirancang untuk melakukan fungsi spesifik seperti penyerapan zat tidak diinginkan (misalnya oksigen, kelembaban, etilen) atau pelepasan zat bermanfaat (misalnya antimikroba, antioksidan, atau nutrisi) untuk mempertahankan atau memperpanjang umur simpan produk serta menjaga keamanan pangan dan performa yang lebih baik (Farousha et al., 2023; Andrade et al., 2025; Vilela et al., 2018) Gambar 3.



Gambar 3. Jenis-jenis bahan aktif yang digunakan dalam kemasan aktif (Kumari et al.,2024)

Prinsip dan Sistem Absorpsi (Scavenger System)

Penyerapan Oksigen (*Oxygen Scavenging*)

Oksigen adalah pemicu utama degradasi makanan melalui oksidasi lipid, perubahan warna, dan kehilangan nutrisi esensial. Kemasan aktif dengan fungsi penyerap oksigen mengintegrasikan zat penyerap seperti bubuk besi, asam askorbat, atau enzim yang bereaksi dengan oksigen tersisa dalam kemasan. Mekanisme ini sangat efektif untuk produk yang sensitif terhadap oksidasi, seperti makanan berlemak, daging, dan produk *seafood* yang dikemas (Mousav dan Mansor, 2024).

Pengendalian Kelembaban (*Moisture Control*)

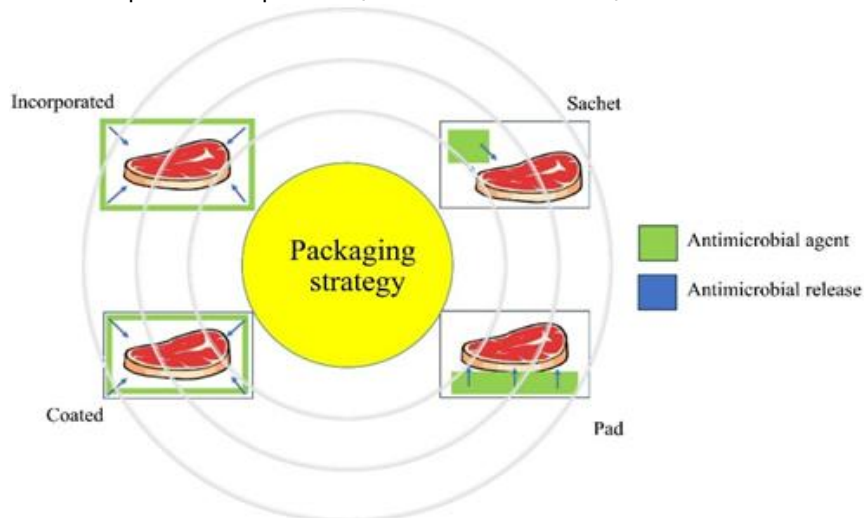
Kemasan aktif dapat mengatur kadar air internal untuk produk tertentu, seperti produk makanan kering (keripik, biskuit, dan lain-lainnya) digunakan desiccants (penyerap kelembaban) (Mane, 2016), sedangkan untuk produk makanan segar yang rentan dehidrasi yang digunakan humectants (penjaga kelembaban dan mempertahankan kadar air.). Kontrol kelembaban yang optimal mempertahankan tekstur, kerenyahan, dan mencegah pertumbuhan mikroorganisme yang memerlukan lingkungan lembab (Monteiro, 2024).

Penyerapan Etilen (*Ethylene Scavenging*)

Penyerapan etilen (*ethylene scavenging*) didefinisikan sebagai proses penghilangan atau pengurangan konsentrasi etilen dari atmosfer penyimpanan melalui mekanisme adsorpsi, absorpsi, atau reaksi kimia oksidasi. Tujuan utama penyerapan etilen adalah menciptakan lingkungan dengan kadar etilen minimal (kurang dari 0.1 ppm) sehingga memperlambat proses pematangan endogen dalam buah dan sayuran, mempertahankan *firmness* (kekerasan), warna, dan nilai nutrisi produk selama periode penyimpanan yang diperpanjang (Mariah et al., 2022). Etilen (C₂H₄) adalah hormon pematangan endogen pada buah-buahan klimakterik seperti pisang, tomat, apel dan lain-lainya. Mekanisme ini memperlambat pematangan, mempertahankan *firmness* (kekerasan), warna, dan memperpanjang umur simpan pascapanen buah secara signifikan.

Prinsip Pelepasan Agen Antimikroba (*Antimicrobial Releasing*)

Agen antimikroba dilepaskan secara terkontrol dan bertahap dari matriks kemasan berbentuk polimer ke permukaan makanan atau kondisi atmosfer dalam ruang kosong di atas produk di dalam kemasan. Senyawa antimikroba yang digunakan umumnya bersumber dari ekstrak alami seperti Ekstrak tanaman, Bakteriosin (nisin), Asam organik (asam sitrat, asam asetat). Keuntungan utama pelepasan terkontrol adalah penggunaan konsentrasi antimikroba yang lebih rendah dibandingkan penambahan langsung ke dalam makanan, mengurangi dampak terhadap sensoris produk (Andrade et al., 2025) Gambar 4.



Gambar 4. Strategi pengembangan kemasan antimikroba (Nor et al., 2025)

Prinsip Pengemasan Atmosfer Termodifikasi (MAP)

Teknologi *Modified Atmosphere Packaging* (MAP) bekerja dengan mengubah komposisi gas di dalam ruang kemasan, proses yang dipengaruhi oleh dua faktor utama: (1) permeabilitas gas melalui bahan kemasan dan (2) respirasi alami produk

yang dikemas. Karena buah-buahan dan sayuran yang baru dipanen memiliki laju respirasi yang tinggi, mereka menjadi lebih rentan terhadap pertumbuhan mikroorganisme patogen pascapanen (Yousefi et al., 2019). Berbagai teknik pengawetan dapat diterapkan untuk menurunkan laju respirasi komoditas segar. MAP menjadi salah satu metode utama yang mengatur proporsi gas dalam kemasan guna memperpanjang umur simpan dan mempertahankan kualitas produk.

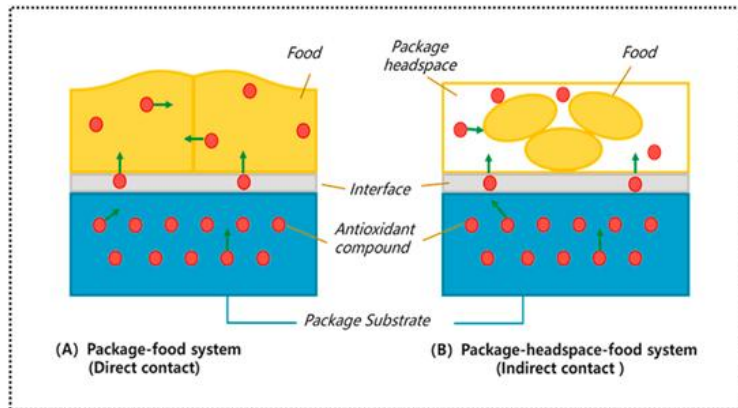
Dalam sistem MAP, atmosfer di dalam kemasan diatur menggunakan tiga gas utama, yaitu karbon dioksida, nitrogen, dan oksigen, dengan konsentrasi CO_2 yang lebih tinggi dan O_2 yang lebih rendah dibandingkan udara normal. Dibandingkan dengan metode penyimpanan konvensional, MAP dapat memperpanjang tanggal kedaluwarsa dari hitungan hari menjadi hitungan minggu. Selain itu, MAP melindungi produk dari kerusakan fisiologis, penurunan berat, serta pertumbuhan jamur, sehingga kualitas dan kesegaran tetap terjaga (Gambar 5)



Gambar 5. Pengemasan Atmosfer yang dimodifikasi (Janani dan Rani, 2024)

Prinsip pengemasan sistem Antioksidan

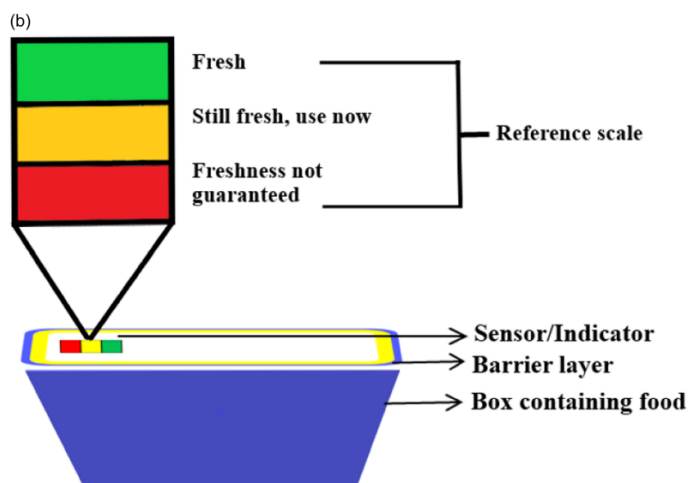
Sistem antioksidan bertujuan mencegah atau memperlambat oksidasi lemak, pigmen, dan komponen gizi. Prinsip kerja kemasan aktif sistem antioksidan adalah mengendalikan reaksi oksidasi dalam pangan dengan cara menghadirkan antioksidan langsung di sistem kemasan, bukan hanya ditambahkan ke makanan (Gambar 6). Oksidasi lipid atau lemak menyebabkan bau tengik, perubahan warna, dan penurunan nutrisi, kemasan aktif mengatasinya dengan menginkorporasi senyawa antioksidan alami (polifenol, vitamin, melanin, karotenoid, dan lain lainnya) ke dalam matriks polimer atau lapisan film, sehingga kemasan berfungsi sebagai sumber antioksidan yang melindungi produk sepanjang penyimpanan (Mustakim et al., 2024). Senyawa ini bekerja dengan menangkap radikal bebas dan spesies oksigen reaktif (*radical scavenging*) atau menyumbang atom hidrogen atau elektron sehingga rantai reaksi oksidasi terputus, yang secara praktis terbukti menurunkan pembentukan produk oksidasi dalam pangan berlemak (Kashtiban et al., 2024).



Gambar 6. Ilustrasi prinsip kerja antioksidan dalam kemasan aktif (Kuai et al.,2021)

Kemasan Pintar (*Intelligent Packaging*)

Kemasan pintar merupakan teknologi yang mampu memantau kondisi lingkungan sekaligus makanan yang dikemas. Teknologi ini dapat menyediakan data secara *real time* terkait keamanan dan mutu pangan, sehingga berperan dalam pencegahan penyakit akibat pangan (Yousefi et al., 2019). Berbeda dengan kemasan konvensional yang hanya mengandalkan label tanggal kedaluwarsa, *intelligent packaging* memberikan informasi aktual mengenai kesegaran, suhu, gas yang terbentuk, pertumbuhan mikroba, maupun kondisi penyimpanan, sehingga mengurangi risiko pangan berbahaya dan pemborosan makanan (Palanisamy et al.,2025; Abekoon et al., 2024). Tidak seperti kemasan aktif yang berfungsi memperpanjang masa simpan, kemasan cerdas tidak bekerja secara langsung terhadap produk. Perannya lebih menitikberatkan pada pemberian informasi dan edukasi kepada para pelaku dalam rantai pasok pangan mengenai aspek keamanan pangan (Gambar 7).



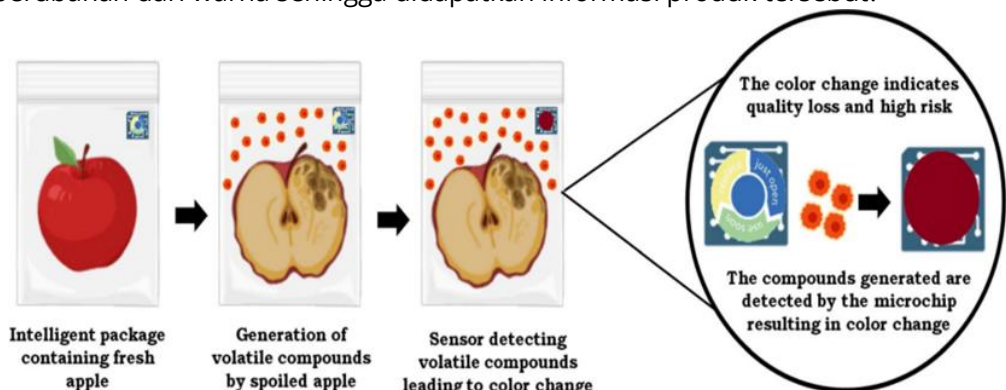
Gambar 7 Mekanisme *Intelligent Packaging* (Vasuki et al., 2023)

Dalam penerapannya, sistem kemasan cerdas didukung oleh tiga teknologi utama yaitu indikator, sensor, dan pembawa data yang masing masing berperan dalam memantau kualitas produk, mendeteksi kondisi lingkungan, serta mengelola informasi logistik sepanjang rantai pasok (Müller et al., 2019). Pembawa data berfungsi sebagai perangkat yang menyimpan serta mentransmisikan informasi terkait kondisi makanan maupun lingkungan sekitarnya (Azeredo & Correa, 2021; Ghaani^a et al.,2016).

Indikator

Indikator merupakan alat yang dapat dipakai untuk memantau mutu makanan. Dengan indikator, informasi mengenai paparan makanan terhadap faktor faktor lingkungan ataupun kondisi kualitasnya pada saat itu dapat disampaikan secara langsung. Walaupun terdapat berbagai jenis indikator, seperti yang berbasis pewarna *fluoresen*, mayoritas indikator yang dipakai adalah indikator koloritik atau warna (Vasuki et al., 2023). Mengubah warna atau menampilkan sinyal optik ketika terjadi perubahan kualitas pangan atau lingkungan (misalnya pH, gas volatil, suhu/waktu) (Kumar et al.,2025; Palanisamy et al.,2025). Menurut Müller et al. (2019) dan Drago et al (2020) *Intelligent packaging* biasanya diklasifikasikan ke dalam tiga komponen utama yakni indikator, sensor, dan data *carrier*, yang masing masing berperan dalam memantau kualitas produk, mendeteksi kondisi lingkungan, serta mengelola informasi logistik sepanjang rantai pasok.

Penggunaan indikator memungkinkan dalam pemeriksaan mutu makanan secara cepat dan tepat, kemasan tersebut dapat memberi sinyal mengenai kesegaran produk, kondisi penyimpanannya, tanggal kadaluarsa, keamanan, serta perkembangan mikroorganisme. Elemen tersebut dapat disematkan pada kemasan utama baik pada bagian internal maupun eksternal pada kemasan sekunder dan tersier, kemudian sinyal tersebut dapat dilihat secara visual dengan melihat perubahan dari warna sehingga didapatkan informasi produk tersebut.



Gambar 8. Mekanisme deteksi kerusakan pada indikator dan sensor (Palanisamy et al., 2025)

Untuk mencapai hal ini, biasanya dipakai indikator aktif, yaitu molekul pewarna yang menilai sifat kimia makanan (Gambar 8). Indikator aktif memungkinkan pemantauan waktu nyata atas perubahan suhu selama penyimpanan, kadar oksigen, serta aktivitas mikrobiologis (Azeredo & Correa, 2021). Karena berkaitan erat dengan produk pangan, label pada kemasan cerdas dapat mengungkapkan adanya atau tidaknya senyawa target, kuantitasnya, atau tingkat keparahan efek berbahaya yang dihasilkan (Azeredo & Correa, 2021). Di antara berbagai jenis indikator kemasan makanan, indikator suhu dan indikator kesegaran merupakan dua yang paling banyak diterapkan (Ghaani^a et al., 2016).

Indikator suhu dan waktu (*Time temperature indicators*)

Suhu merupakan faktor penting dalam memantau serta menentukan masa simpan produk makanan, khususnya bagi produk yang mudah rusak. Salah satu tantangan terbesar dalam industri makanan segar adalah menjaga kualitas produk dengan melindunginya dari perubahan suhu yang tidak diinginkan, yang merupakan tugas yang cukup kompleks. Pemantauan dan pengendalian suhu sepanjang rantai pasok sangat penting untuk mempertahankan mutu dan keamanan makanan. Pengelolaan suhu yang kurang tepat atau tidak terkontrol berpotensi menyebabkan kerugian besar, baik selama proses produksi maupun distribusi. Beberapa kajian telah dilakukan bahwa manajemen suhu yang buruk dalam logistik pada produk makanan segar dapat mengakibatkan kehilangan produk hingga 35% (Göransson et al., 2018).

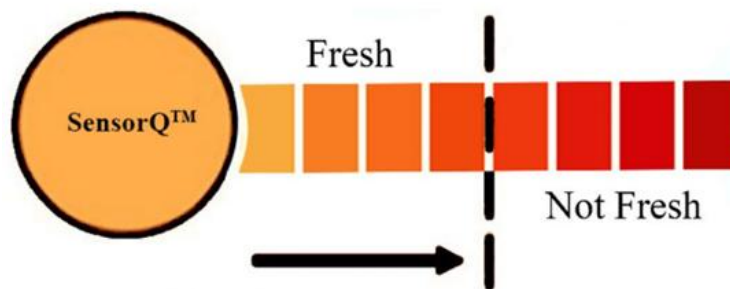
Untuk mengatasi masalah ini, indikator waktu dan suhu (TTI) menjadi alat yang sangat berguna. Indikator suhu berfungsi sebagai penanda sekunder untuk menilai kesegaran dan kualitas makanan karena keakuratannya bergantung pada perubahan suhu yang dialami produk (Gambar 9). Indikator ini memberikan informasi mengenai kondisi eksternal makanan, apakah produk tersebut mengalami paparan panas atau dingin pada suhu yang ekstrim (Vasuki et al., 2023). Indikator suhu dibagi menjadi dua kategori utama yakni indikator termokromik dan indikator waktu dan suhu (TTI). Indikator termokromik menampilkan perubahan warna sebagai respons terhadap perubahan suhu, sementara TTI memonitor durasi penyimpanan produk pada suhu tertentu (Khan et al., 2022). Dengan informasi dari indikator ini, konsumen dapat memahami potensi risiko terhadap keamanan pangan, seperti pertumbuhan mikroba, denaturasi protein, atau kerusakan emulsi akibat penyimpangan suhu.



Gambar 9. Perbedaan warna produk segar dan kadaluarsa menggunakan TTI (Rönnow, 2016)

Indikator kesegaran (*Freshness indicators*)

Indikator kesegaran merupakan alat pintar yang digunakan untuk memantau mutu makanan selama proses penyimpanan dan distribusi. Penurunan kesegaran bisa terjadi akibat paparan kondisi yang merugikan atau penyimpanan melebihi jangka waktu yang direkomendasikan. Berbeda dengan indikator suhu, indikator kesegaran mampu memberikan informasi langsung mengenai kualitas produk dengan menganalisis reaksi kimia yang terjadi akibat kerusakan makanan oleh mikroorganisme tertentu (Kalpana et al.,2019).



Gambar 10. Mekanisme kerja Indikator kesegaran (Pavelková . 2013)

Kinerja dari indikator kesegaran ini adalah untuk menentukan perubahan kimia dan mikroba yang menyebabkan pembusukan makanan (Gambar 10). Perubahan kadar metabolit, seperti glukosa, asam organik, etanol, karbon dioksida, amina biogenik, senyawa nitrogen volatil, maupun turunan sulfur, dapat mencerminkan aktivitas dan perkembangan dari mikroorganisme. Oleh karena itu, keberadaan dan perubahannya dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam pengembangan indikator kesegaran produk (Poyatos et al.,2018).

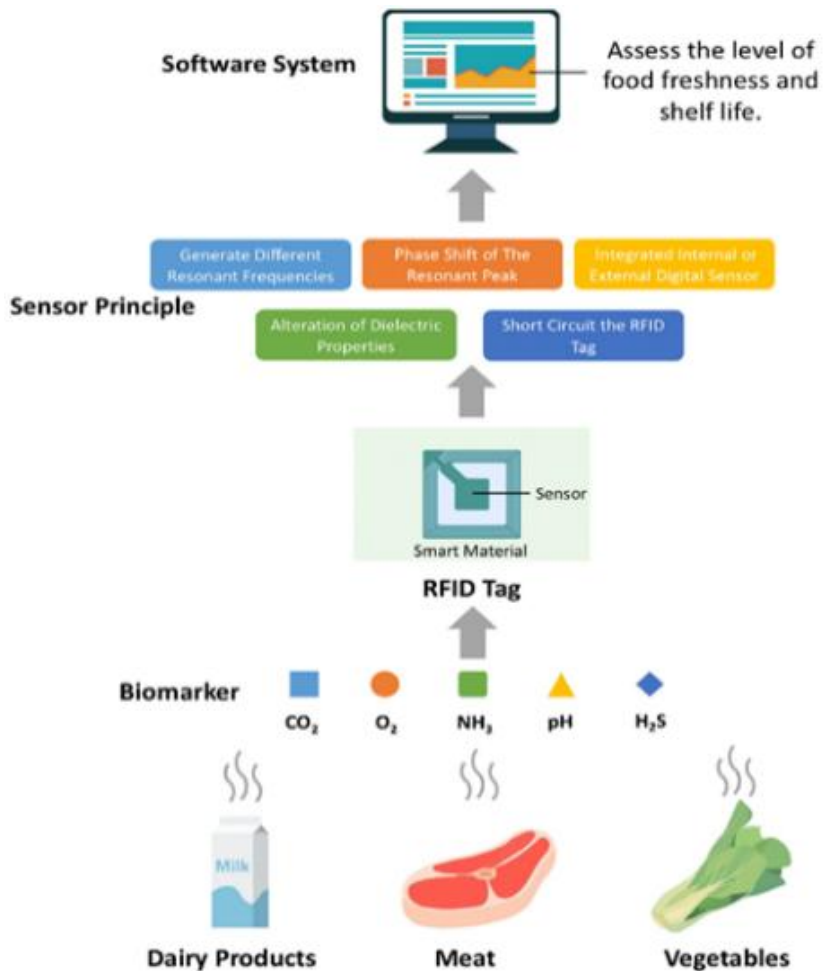
Indikator kesegaran yang memanfaatkan keberadaan amina atau H₂S dapat diaplikasikan untuk menilai mutu produk daging. Indikator ini dirancang untuk

memberikan respons, seperti perubahan warna atau sinyal tertentu, ketika konsentrasi amina atau H₂S mencapai batas yang telah ditentukan, sehingga membantu konsumen dalam menilai kesegaran dan keamanan produk daging sebelum dikonsumsi (Zhang et al., 2019).

Gas amina merupakan senyawa organik yang terbentuk dari proses degradasi protein dan umumnya memiliki aroma amis atau menyerupai amonia, sehingga sering dikaitkan dengan terjadinya pembusukan. Sementara itu, hidrogen sulfida (H₂S) adalah gas yang dihasilkan dari pemecahan asam amino yang mengandung sulfur dan memiliki bau khas yang menyengat, yang juga menjadi penanda kerusakan makanan.

Rantai pasokan makanan menggunakan identifikasi frekuensi radio (*radiofrequency identification* RFID)

Dalam rantai pasok pangan, teknologi identifikasi frekuensi radio (RFID) dimanfaatkan untuk memantau pergerakan produk makanan. Tag RFID memungkinkan otomatisasi berbagai proses, meskipun penerapannya untuk pengumpulan informasi terkait nilai gizi, ketertelusuran produk, pencegahan pencurian, serta perlindungan terhadap pemalsuan masih relatif terbatas (Ghaani^a et al., 2016). Sistem RFID tersusun atas tiga komponen utama, yaitu antena, chip, dan pembaca. Antena berfungsi berkomunikasi dengan chip yang menyimpan data produk, sementara pembaca memancarkan gelombang radio yang dipantulkan kembali oleh tag untuk dibaca. Informasi yang diperoleh kemudian diteruskan ke komputer utama untuk disimpan dan diolah. Teknologi RFID memiliki peran penting dalam industri pangan karena mampu meningkatkan efisiensi operasional, ketertelusuran, dan aspek keamanan. Meskipun penggunaan tag RFID untuk memantau kualitas makanan masih jarang diterapkan, potensi pengembangannya cukup besar (Bibi et al., 2017). Selain itu, penambahan sensor CO₂, O₂, NH₃, pH, H₂S pada label RFID telah digunakan tidak hanya untuk mengatur kematangan sayuran, kesegaran ikan dan daging, tetapi juga untuk meningkatkan keamanan serta kualitas produk susu (Zuo et al, 2022) Gambar 11.



Gambar 11. Proses utama RFID untuk memantau kesegaran makanan (Zuo et al, 2022)

Bardcode (representasi data visual)

Bardcode adalah pola garis dan celah paralel yang dapat dibaca oleh mesin, menyimpan data informasi menjadi kode rahasia yang kemudian didekode dan dikirim ke sistem untuk diproses. *Bardcode* digunakan untuk identifikasi produk, pengelolaan inventaris, dan otomatisasi proses pembayaran, serta umum diterapkan di toko ritel, gudang, dan tempat lain yang menangani produk (Chowdhury dan Morey, 2019). *Bardcode* terbagi menjadi dua jenis: linier dan 2 dimensi, dengan *bardcode linier* sebagai yang paling sering digunakan karena tersusun dari garis dan spasi paralel yang mudah dipindai. Penggunaan bardcode membantu bisnis melacak produk dan inventaris, meningkatkan efisiensi dan akurasi, serta menghemat waktu dan biaya (Gambar 12)



Gambar 12. Model-model barcode yang umum digunakan (Kumar et al.,2025)

Sensor (*Smart Sensors*)

Sensor merupakan perangkat yang berfungsi untuk mendeteksi, menentukan lokasi, atau mengukur energi maupun materi tertentu, serta menghasilkan sinyal sebagai respons terhadap pengukuran atau pendeteksian sifat fisik dan kimia tertentu (Müller et al.,2019). Pemanfaatan sensor menjadi alternatif terhadap metode analitik konvensional yang umumnya membutuhkan biaya tinggi, waktu analisis yang panjang, serta bersifat destruktif (Vanderroost et al., 2014). Dalam sistem kemasan cerdas, berbagai jenis sensor telah diterapkan untuk memantau kondisi produk.

Pemantauan pangan dalam kemasan umumnya difokuskan pada parameter seperti suhu, pembentukan gas, tingkat kelembapan, serta pertumbuhan mikroorganisme (Yousefi et al., 2019). Secara umum, sensor tersusun atas dua komponen utama, yaitu reseptor yang berperan dalam mendeteksi dan mengenali parameter fisik atau kimia, serta transduser yang mengonversi sinyal tersebut ke dalam bentuk energi yang dapat diukur (Müller et al., 2019; Caon et al., 2017; Drago et al., 2020).



Gambar 13. Ilustrasi kemasan pintar dengan indikator dan sensor yang memonitor oksigen, karbon dioksida, atau amonia secara real time, indikator berubah warna, sedangkan sensor mengubah data menjadi sinyal listrik secara digital

Sensor yang digunakan dalam kemasan cerdas dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama, antara lain sensor gas, sensor kimia, biosensor, elektronik cetak, dan senyawa volatil (Vasuki et al., 2023). Sensor ini mampu mengenali gas yang dilepaskan selama proses pembusukan pangan. Pada kondisi pembusukan daging, misalnya, gas seperti amonia (NH_3), etanol, dan hidrogen sulfida (H_2S) akan dilepaskan dan dapat terdeteksi oleh sensor (Wang et al., 2025). Dalam penerapan kemasan pintar, telah dikembangkan sensor hibrida yang berfungsi sebagai sensor nirkabel untuk memantau pelepasan amina dari daging sapi, ikan, dan berbagai produk daging lainnya (Andre et al., 2021) (Gambar 13). Selain itu, karena adanya potensi migrasi senyawa berbahaya dari material kemasan ke dalam makanan selama interaksi keduanya, penggunaan sensor elektrokimia menjadi penting untuk mendeteksi keberadaan senyawa tersebut (Ghaani^b et al., 2018). Biosensor juga berperan dalam evaluasi mutu pangan serta mampu mendeteksi mikroorganisme patogen penyebab penyakit bawaan makanan (Ghaani^a et al., 2016).

Potensi limbah agro sebagai bahan smart packaging

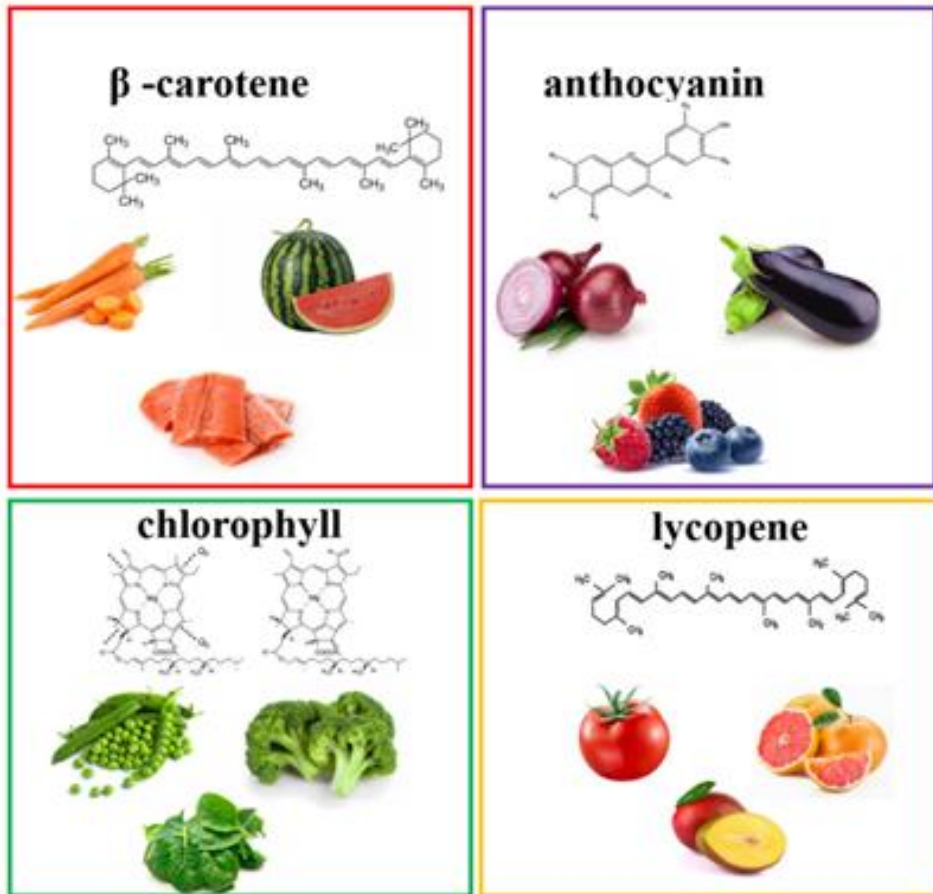
Smart packaging berbasis limbah agro memadukan tiga konsep besar: (1) pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber biopolimer dan penguat (filler) sebagai material kemasan, (2) fungsi aktif (antioksidan, antimikroba, pengendali atmosfer), dan (3) fungsi pintar atau *intelligent packaging* berupa indikator atau sensor yang memberi informasi mutu atau keamanan pangan secara real time. Pendekatan ini sejalan dengan ekonomi sirkular karena mengonversi residu bernilai rendah atau limbah agro seperti kulit, ampas, dedak, sekam, cangkang telur, dan lain-lainnya menjadi bahan pengemasan bernilai tambah tinggi sekaligus mengurangi penggunaan plastik berbasis sintetik (Malik, 2025; Selvam et al., 2025; Duguma et al., 2023).

Limbah agro industri dari sereal, tebu, buah, sayur dan produk hewani diketahui kaya selulosa, hemiselulosa, lignin, pati, pektin, protein, kitosan, alginat, dan kitin yang dapat diekstraksi menjadi biopolimer untuk film, coating, atau komposit untuk bahan pelapisan kemasan (Gambar 14). Biopolimer ini secara alami biodegradabel dan biokompatibel, sehingga menjawab isu polusi plastik sekali pakai yang banyak digunakan dalam produk pangan (Sharma et al., 2025).



Gambar 14. Klasifikasi hierarkis sumber limbah agro berdasarkan jenis biopolimer utama yang diekstraksi dalam pembuatan film atau pelapisan kemasan biodegradable films (Bie et al., 2025)

Selain fraksi struktural, banyak limbah agro mengandung senyawa bioaktif (polifenol, karotenoid, antosianin, minyak atsiri) yang bersifat antioksidan, antimikroba, dan sensitif terhadap pH atau gas (gambar 15). Senyawa inilah yang kemudian difungsikan sebagai komponen aktif (*active packaging*) sekaligus elemen sensor/indikator (*intelligent packaging*). Tinjauan mengenai pemanfaatan hasil samping agro industri dalam intelligent food packaging menegaskan bahwa ekstrak kulit buah, ampas anggur, kulit kacang, dan lain lainnya yang dapat dimanfaatkan menjadi sumber pigmen atau warna dan antioksidan untuk indikator atau sensor dalam sistem kemasan. (Nemes et al., 2020).



Gambar 15. Struktur kimia pigmen bioaktif (Nemes et al., 2020)

Kemasan aktif menyediakan fungsi tambahan di luar sekadar penghalang fisik, misalnya aktivitas antimikroba dan antioksidan, kemampuan menyerap kelembapan, serta bertindak sebagai scavenger O_2 , CO_2 , atau etilena untuk mengatur atmosfer di sekitar pangan. Bahan aktif ini dapat dirancang dalam sistem yang melepaskan senyawa secara terkendali (*releasing system*) maupun yang terikat pada matriks kemasan (*immobilized*).

Sementara itu, kemasan pintar dilengkapi sensor atau indikator yang mampu mendeteksi perubahan fisik, kimia, maupun biologis seperti pH, gas, senyawa volatil, suhu, dan waktu, lalu menampilkannya secara visual melalui perubahan warna atau secara elektronik melalui RFID, QR code, dan *barcode* kepada konsumen, retailer, atau produsen. Limbah agro berperan di dua level, yakni :

- Sebagai matriks polimer: misalnya selulosa dan lignoselulosa dari sekam, tongkol, kulit dan ampas diolah menjadi film/komposit yang menjadi "carrier" bagi sensor atau senyawa aktif (Saba et al., 2020)

- b) Sebagai sumber senyawa sensitif: pigmen antosianin dari limbah buah, polifenol dari pomace, atau ekstrak biji menjadi indikator warna pH atau gas dan antioksidan dan antimikroba di dalam film (Nemes et al.,2020)

Kombinasi ini memungkinkan satu kemasan mampu sekaligus melindungi produk melalui fungsi *barrier*, mekanik, dan aktif, serta mengomunikasikan status kesegaran atau kerusakan pangan melalui indikator atau sensor. Komposisi kimia limbah agro merupakan faktor kunci dalam menentukan potensi aplikasinya pada film kemasan biodegradable. Pada Tabel 2 menyoroti perbedaan peran fungsional tiap kategori limbah, yang memungkinkan perancangan material kemasan secara terarah dengan peningkatan integritas struktural dan fungsionalitas tambahan.

Tabel 2. Tabel. Potensi Limbah Agro sebagai Sumber Biopolimer dan Senyawa Bioaktif untuk Aplikasi Film Kemasan

Sumber Limbah	Kategori	Komponen Kimia Utama (% Berat Kering)	Potensi Aplikasi dalam Film Kemasan	Referensi
Jerami Gandum	Limbah Pertanian	Selulosa (35–45%), Hemiselulosa (20–30%), Lignin (15–20%)	Ekstraksi selulosa sebagai bahan penguat untuk meningkatkan kekuatan mekanik	(Uthpala et al.,2021)
Ampas Apel	Limbah Makanan	Pektin (10–20%), Selulosa (15–25%), Senyawa Fenolik	Sebagai matriks pembentuk film (pektin) atau untuk ekstraksi antioksidan sebagai bahan aktif tambahan	(Khodaei et al., 2021)
Cangkang Udang	Limbah Hewani	Kitin (20–40%), Protein (20–40%), Kalsium Karbonat (30–50%)	Ekstraksi kitosan untuk pembuatan film aktif dengan sifat antimikroba yang baik	(Rossi et al., 2020)
Okara(Ampas Kedelai)	Limbah Makanan	Protein (20–30%), Serat (50–60%), Lipid (8–15%)	Ekstraksi isolat protein kedelai sebagai matriks pembentuk film; serat digunakan sebagai filler	(Yıldız et al.,2024)

Kulit Sapi	Limbah Hewani	Kolagen (>85%)	Ekstraksi gelatin untuk produksi film edible dengan penghalang oksigen tinggi dan transparansi baik	(Sani et al., 2023)
Ampas Anggur	Limbah Makanan	Selulosa (10–20%), Antosianin, Senyawa Fenolik	Ekstraksi antosianin untuk pembuatan indikator kemasan pintar yang sensitif terhadap pH	(ChaÑi Paucar et al.,2023)

Keunggulan dan Kontribusi Terhadap Keberlanjutan

Dari aspek keberlanjutan, penggunaan limbah agro sebagai basis smart packaging menawarkan beberapa keunggulan utama. Limbah agro yang biasanya dibakar atau dibuang ke tempat pembuangan akhir dapat dikonversi menjadi bahan kemasan, sehingga mengurangi volume limbah dan potensi emisi gas rumah kaca. Biopolimer yang dihasilkan dari limbah ini juga menggantikan sebagian penggunaan plastik konvensional berbasis minyak bumi yang selama ini menjadi sumber polusi lingkungan dan ancaman kesehatan. Berbagai kajian menyatakan bahwa biopolimer dan kemasan berbasis residu agro berkontribusi langsung pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya terkait pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan serta pengurangan food waste, tetapi inovasi ini berperan penting dalam mengurangi kerugian pangan pascapanen (*food loss*). Dengan memperpanjang umur simpan produk dan memungkinkan pengambilan keputusan berdasarkan kualitas aktual.

Dari sisi keamanan dan mutu pangan, integrasi komponen aktif dan sensor dalam kemasan memungkinkan perpanjangan umur simpan melalui penghambatan oksidasi dan pertumbuhan mikroba, sebagaimana ditunjukkan pada komoditas seperti tomat, daging, ikan keju, sayuran segar dan produk segar yang lainnya. Di samping itu, kemampuan untuk memantau kesegaran secara visual maupun digital memungkinkan konsumen dan pelaku usaha mengambil keputusan berdasarkan kondisi aktual produk, bukan semata-mata pada tanggal kedaluwarsa, sehingga berpotensi mengurangi pembuangan pangan yang sebenarnya masih layak konsumsi. Selain itu, penerapan kemasan cerdas berbasis limbah agro juga mendukung transparansi dan efisiensi dalam rantai pasok pangan. Informasi real-time yang dihasilkan oleh sensor atau indikator kesegaran dapat membantu produsen, distributor, dan pengecer dalam mengoptimalkan penyimpanan serta distribusi produk pangan, sehingga risiko kerusakan selama transportasi dapat diminimalkan. Dengan demikian, inovasi ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan keberlanjutan lingkungan, tetapi juga memberikan nilai tambah ekonomi dan sosial melalui pengurangan kerugian pangan, peningkatan keamanan

pangan, serta peningkatan kepercayaan konsumen terhadap kualitas produk yang dikonsumsi.

Tantangan Pengembangan Material Limbah Agro Untuk Kemasan Cerdas

Pengembangan material limbah agro untuk kemasan cerdas menghadapi sejumlah tantangan teknis, ekonomi, dan regulasi yang tidak sederhana meskipun potensinya sangat besar, meliputi:

- 1) Sifat material, banyak biopolimer berbasis limbah agro (pati, selulosa, hemiselulosa, pektin, lignin) bersifat hidrofilik, rapuh, dan memiliki daya hambat uap air serta kekuatan mekanik yang lebih rendah dibanding plastik fosil. Film berbasis pati dan polisakarida memang mudah terurai dan mampu membentuk film, tetapi umumnya rapuh, mudah menyerap air, dan memiliki resistensi uap air yang buruk (Peng et al.,2025). Sehingga sifat dasar biopolimer limbah agro yang masih perlu banyak modifikasi untuk menyamai kinerja plastik konvensional.
- 2) Proses ekstraksi dan pemurnian biopolimer dari limbah agro sering melibatkan pretreatment secara kimia atau fisika yang intensif, seperti penggunaan alkali, asam, pelarut, enzim, atau kombinasi perlakuan hidrotermal dan mekanik. Hal ini menimbulkan kebutuhan tambahan akan energi, bahan kimia, serta biaya, sehingga menjadikan proses ekstraksi dan formulasi lebih kompleks dan mahal. Dalam pembuatan film atau plastik banyak sistem memerlukan langkah modifikasi tambahan, seperti crosslinking, penambahan plastisiser, pengisi nano atau perlakuan permukaan, guna menyeimbangkan kekuatan mekanik, sifat penghalang, dan biodegradabilitas. Hal ini membuat rantai proses menjadi lebih panjang dan kompleks (Feng et al.,2025).
- 3) Standarisasi dan konsistensi bahan baku. Karakteristik limbah agro sangat dipengaruhi oleh varietas tanaman, musim, lokasi geografis, serta teknik budidaya yang menyebabkan kandungan lignoselulosa atau pati dan tingkat pengotor seperti abu, silika, serta senyawa ekstraktif dapat bervariasi. Variabilitas ini menjadi tantangan tersendiri dalam pencapaian sifat film yang seragam tanpa penerapan sistem pengendalian mutu dan proses yang ketat. Kajian lain menekankan pentingnya melakukan karakterisasi dari limbah agro untuk mengetahui ketersediaan dan kualitas residu, serta menetapkan tingkat ekstraksi yang berkelanjutan agar pemanfaatan limbah agro tidak merusak fungsi ekologis residu di lahan pertanian (Baskar et al., 2022).
- 4) Integrasi fungsi kemasan cerdas baik aktif maupun *intelligent*, pada matriks biopolimer berbasis limbah agro menimbulkan tingkat kompleksitas tambahan dalam pengembangan materialnya. Komponen aktif (antioksidan, antimikroba, scavenger gas) atau sensor (indeks pH, indikator waktu dan suhu, pewarna sensitif volatil) harus terdistribusi stabil di dalam matriks

yang sifat dasarnya hidrofilik dan mudah terdegradasi. Berbagai kajian melaporkan bahwa penambahan ekstrak tanaman atau nanopartikel aktif mampu meningkatkan aktivitas antioksidan dan antimikroba, namun sering disertai penurunan kejernihan film, peningkatan penyerapan air, serta perubahan sifat mekanik yang menyebabkan material menjadi terlalu lunak atau rapuh (Irhamni et al., 2025)

- 5) Keamanan pangan, migrasi, dan regulasi menjadi tantangan kunci sebelum kemasan cerdas berbasis limbah agro dapat digunakan pada skala industri. Persyaratan regulasi dan uji keamanan pangan yang ketat. Semua komponen baik biopolimer maupun aditif aktif atau sensorik harus memenuhi batas migrasi global dan spesifik, tidak bersifat toksik, tidak memicu alergi, dan tidak menurunkan mutu organoleptik pangan. Hal yang sama berlaku untuk pigmen alami, seperti antosianin, ekstrak tanaman, dan residu kopi, yang berpotensi mengubah warna, rasa, atau aroma produk apabila migrasinya tidak dikendalikan secara tepat (Wardana et al., 2025).
- 6) Skala industri dan penerimaan pasar. Berbagai kajian studi menunjukkan performa menjanjikan di skala laboratorium, tetapi ketika di *scale up*, isu pasokan limbah yang kontinyu, infrastruktur pengumpulan dan pemrosesan, investasi peralatan (ekstraktor, homogeniser, reaktor, pengering film), dan biaya unit produk sering membuat material ini yang belum dapat bersaing secara langsung dengan plastik konvensional yang sangat mapan dalam rantai pasok.

Transisi menuju penerapan kemasan cerdas berbasis biopolimer dari limbah agro memerlukan perhatian pada regulasi, penerimaan pasar, dan desain produk. Standar serta pedoman teknis untuk material ini masih dalam tahap pengembangan, sementara industri pangan sangat berhati-hati terkait risiko keamanan dan ketersediaan pasokan. Konsumen juga harus diyakinkan bahwa kemasan berbasis limbah aman, estetis, dan tidak mengurangi pengalaman penggunaan. Upaya ini membutuhkan edukasi, pelabelan yang transparan, serta kolaborasi lintas sektor antara akademisi, industri, dan pemerintah untuk menjembatani kesenjangan antara bukti laboratorium dan implementasi di pasar.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pendekatan ontologis dalam smart packaging berbasis limbah agro berkontribusi pada tiga tingkat sekaligus: (1) konseptual, dengan mengubah cara pandang terhadap limbah menjadi sumber daya kemasan cerdas; (2) fungsional, dengan menunjukkan bagaimana atribut esensial limbah dapat diartikulasikan menjadi performa protektif, aktif, dan *intelligent* serta (3) normative strategis, dengan mengarahkan agenda riset dan kebijakan pada penguatan aspek teknis, regulasi, dan sosial maupun ekonomi agar potensi ini benar benar terwujud dalam praktik skala industri. Keberhasilan transformasi ini sangat tergantung pada kolaborasi

interdisipliner dan lintas sektor untuk menjembatani kesenjangan antara hakikat limbah agro sebagai bahan kemasan cerdas dan penerapan nyata di industri pangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Doktor Pertanian Berkelanjutan, Universitas Mataram, para peneliti dan akademisi yang karyanya menjadi dasar kajian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada rekan sejawat atas masukan dan dukungannya dalam penyempurnaan manuskrip ini.

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, 160. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00371-7>
- Achmadi, E. R. (2023). Strategies Managing Smart Packaging For Food Application. *Journal of Food and Agricultural Product*, 3(1), 9–26. <https://doi.org/10.32585/jfap.v3i1.3593>
- Amin, U., Khan, M. K. I., Maan, A. A., Nazir, A., Riaz, S., Khan, M. U., Sultan, M., Munekata, P. E. S., & Lorenzo, J. M. (2022). Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100903. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100903>
- Andre, R. S., Ngo, Q. P., Fugikawa Santos, L., Correa, D. S., & Swager, T. M. (2021). Wireless tags with hybrid nanomaterials for volatile amine detection. *ACS Sensors*, 6(6), 2457–2464. <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c00812>
- Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Ribeiro Santos, R., Tomé, S., Fernando, A. L., Silva, A. S., & Vilarinho, F. (2025). Emerging trends in active packaging for food: A six year review. *Foods*, 14(15), 2713. <https://doi.org/10.3390/foods14152713>
- 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/10.1016/j.crfs.2021.11.016>
- Baneshi, M., Aryee, A. N. A., English, M., & Mkandawire, M. (2024). Designing plant-based smart food packaging solutions for prolonging the consumable life of perishable foods. *Food Chemistry Advances*, 5, 100769. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100769>

- Baskar, C., Ramakrishna, S., Baskar, S., Sharma, R., Chinnappan, A., & Sehwat, R. (2022). Handbook of Solid Waste Management. *Springer Singapore Pte. Limited*. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4230-2>
- Bhatlawande, A. R., Ghatge, P. U., Shinde, G. U., Anushree, R. K., & Patil, S. D. (2024). Unlocking the future of smart food packaging: biosensors, IoT, and nano materials. *Food Science and Biotechnology*, 33(5), 1075–1091. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01486-9>
- 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/10.1016/j.tifs.2017.01.013>
- Bie, M., Zhao, W., Dong, H., Gu, Y., Yuan, S., & Song, K. (2025). From agricultural waste to recyclable biodegradable packaging: A systematic and bibliometric review. *Sustainability*, 17(23), 10742. <https://doi.org/10.3390/su172310742>
- Caon, T., Martelli, S. M., & Fakhouri, F. M. (2017). New trends in the food industry: Application of nanosensors in food packaging. In *Nanobiosensors* (pp. 375–400). *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804301-1.00018-7>
- Carnaval, L. d. S. C., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2024). Agro-Food Waste Valorization for Sustainable Bio-Based Packaging. *Journal of Composites Science*, 8(2), 41. <https://doi.org/10.3390/jcs8020041>
- Chañi Paucar, L. O., Silva, J. W. L., Maciel, M. I. S., & Lima, V. L. A. G. de. (2023). Simplified process of extraction of polyphenols from agroindustrial grape waste. *Food Science and Technology*, 43, e31120. <https://doi.org/10.1590/fst.31120>
- Cheng, H., Xu, H., McClements, D. J., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., Miao, M., & Jin, Z. (2022). Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, 375, 131738. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131738>
- Chowdhury, E. U., & Morey, A. (2019). Intelligent packaging for poultry industry. *Journal of Applied Poultry Research*, 28(4), 791–800. <https://doi.org/10.3382/japr/pfz098>
- De Paola, M. G., Andreoli, T., Lopresto, C. G., & Calabrò, V. (2022). Starch/pectin biobased films: How initial dispersions could affect their performances. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(17), 52032. <https://doi.org/10.1002/app.52032>
- Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., & Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*, 9(11), 1628. <https://doi.org/10.3390/foods9111628>

- Duda Chodak, A., Tarko, T., & Petka Poniatowska, K. (2023). Antimicrobial compounds in food packaging. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 2457. <https://doi.org/10.3390/ijms24032457>
- Duguma, H. T., Khule, P., McArdle, A., Fennell, K., & Almenar, E. (2023). Turning agricultural waste into packages for food: A literature review from origin to end-of-life. *Food Packaging and Shelf Life*, 40, 101166. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101166>
- Farousha, K., Tham, P. E., Chew, K. W., Amornraksa, S., & Show, P. L. (2023). The future of food preservation: Active packaging with controlled release systems. *E3S Web of Conferences*, 428, 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342802009>
- Feng, T. Y., Nur Hidayah, M. I., Han Lyn, F., & Nur Hanani, Z. A. (2025). Physical and functional properties of pulsed-ultraviolet treated starch based films with papaya leaf extract. *Sustainable Food Technology*, 3, 1986–1995. <https://doi.org/10.1039/D5FB00350D>
- Ganeson, K., Govindan, M., Bhubalan, K., & Razali, R. M. (2023). Smart packaging – A pragmatic solution to approach sustainable food waste management. *Food Packaging and Shelf Life*, 36, 101044. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101044>
- Ghaani^a, M., Cozzolino, C., Castelli, G., & Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008>
- Ghaani^b, M., Pucillo, F., Olsson, R. T., Scampicchio, M., & Farris, S. (2018). A bionanocomposite modified glassy carbon electrode for the determination of 4,4' methylene diphenyl diamine. *Analytical Methods*, 10(34), 4122–4128. <https://doi.org/10.1039/C8AY01376D>
- Göransson, M., Nilsson, F., & Jevinger, Å. (2018). Temperature performance and food shelf life accuracy in cold food supply chains Insights from multiple field studies. *Food Control*, 86, 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.10.029>
- Goswami, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Agarwal, R., Ganguly, A., Nanda, S., & Rajak, P. (2024). The alarming link between environmental microplastics and health hazards with special emphasis on cancer. *Life Sciences*, 355, 122937. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2024.122937>
- Heo, W., & Lim, S. (2024). A review on gas indicators and sensors for smart food packaging. *Foods*, 13(19), 3047. <https://doi.org/10.3390/foods13193047>

- Irhamni, Munandar, A., Saudah, Hidayat, F., Nurman, S., Lisafitri, Y., & Sabrina, O. (2025). Eco-friendly development of biocomposite films from *Durio zibethinus* Murr. seeds reinforced with nanocellulose and functional carrageenan additives. *Global Journal of Environmental Science & Management*, 11(4), 1567–1578. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2025.04.12>
- Jamróz, E., Kulawik, P., Krzyściak, P., Talaga Ćwiertnia, K., & Juszcak, L. (2019). Intelligent and active furcellaran gelatin films containing green or Pu Erh tea extracts: Characterization, antioxidant and antimicrobial potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 745–757. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.008>
- Janani, L. R., & Rana, S. S. (2024). Modern and traditional food preservation and packaging technologies: Principles, applications, and implications. In *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences* (Vol. 3, Book 15, pp. 132–165). *IIP Series*. <https://doi.org/10.58532/V3BCAG15P2CH2>
- Kalpana, 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/10.1016/j.tifs.2019.09.008>
- Kashtiban, A. E., Okpala, C. O. R., Karimidastjerd, A., & Zahedinia, S. (2024). Recent advances in nano-related natural antioxidants, their extraction methods and applications in the food industry. *Exploration of Foods and Foodomics*, 2(2), 125–154. <https://doi.org/10.37349/eff.2024.00030>
- Khan, A. W., Roobab, U., Shehzadi, K., Inam Ur Raheem, M., & Aadil, R. M. (2022). Clean label interventions in active and intelligent food packaging. Dalam C. M. Galanakis (Ed.), *The Age of Clean Label Foods* (hal. 161–208). *Springer Cham*. https://doi.org/10.1007/9783030966980_6
- Khodaei, D., Álvarez, C., & Mullen, A. M. (2021). Biodegradable packaging materials from animal processing co products and wastes: An overview. *Polymers*, 13(15), 2561. <https://doi.org/10.3390/polym13152561>
- Kuai, L., Liu, F., Chiou, B.-S., Avena-Bustillos, R. J., McHugh, T. H., & Zhong, F. (2021). Controlled release of antioxidants from active food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*, 120, 106992. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106992>
- Kumar, R., Kutagulla, T., Vasudevan, V., George, J., & Semwal, A. D. (2025). New perspectives in intelligent food packaging. *Journal of Packaging Technology and Research*, 9, 59–76. <https://doi.org/10.1007/s41783-025-00182-9>
- Kumari, S., Debbarma, R., Nasrin, N., Khan, T., Taj, S., & Bhuyan, T. (2024). Recent advances in packaging materials for food products. *Food Bioengineering*, 3(2), 236–249. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12096>

- Malik, S. (2025). Utilizing food waste for sustainable packaging: A biodegradable approach to replacing plastic. *International Journal of Smart Agriculture*, 3(1), 12–23. <https://doi.org/10.54536/ijsa.v3i1.3814>
- Mane, K. A. (2016). A review on active packaging: An innovation in food packaging. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 1(3), 544–549. <https://doi.org/10.22161/ijeab/1.3.35>
- Mariah, M. A. A., Vonnie, J. M., Erna, K. H., Nur'Aqilah, N. M., Huda, N., Abdul Wahab, R., & Rovina, K. (2022). The emergence and impact of ethylene scavengers techniques in delaying the ripening of fruits and vegetables. *Membranes*, 12(2), 117. <https://doi.org/10.3390/membranes12020117>
- Monteiro, C. A. (2024). Hydration strategies for processed foods: Balancing moisture content and nutritional value. *African Journal of Food Science and Technology*, 15(8), 1–2. <https://doi.org/10.14303/ajfst.2024.099>
- Moustafa, H., Youssef, A. M., Darwish, N. A., & Abou-Kandil, A. I. (2019). Eco-friendly polymer composites for green packaging: Future vision and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 172, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.048>
- Mousavi, M. M., & Mahmoudpour, M. (2024). Function and application of some active and antimicrobial packaging in the food industry: A review. *Journal of Microbiota*, 1(1), e144616. <https://doi.org/10.5812/jmb-144616>
- Muñiz, A., Fabra, M. J., & López Rubio, A. (2021). Smart packaging in the food industry: An overview of concepts, materials and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.028>
- Müller, P., & Schmid, M. (2019). Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. *Foods*, 8(1), 16. <https://doi.org/10.3390/foods8010016>
- Mustakim, Z., Prasetya, A., Wintoko, J., Kayati, F. N., & Purnomo, C. W. (2024). Review on melanin application as an antibacterial and antioxidant agent in food packaging. *Indonesian Journal of Chemistry*, 24(6), 1906–1920. <https://doi.org/10.22146/ijc.95550>
- Nemes, S. A., Szabo, K., & Vodnar, D. C. (2020). Applicability of agro industrial by products in intelligent food packaging. *Coatings*, 10(6), 550. <https://doi.org/10.3390/coatings10060550>
- Nor, A. H. A., Jalil, M. T. M., Seow, E. K., Idris, M. H. M., & Yahya, M. F. Z. R. (2025). Antimicrobial packaging: mechanisms, materials, incorporation methods, strategies, biodegradability, and smart innovations a comprehensive review. *Food Materials Research*, 5, e009. <https://doi.org/10.48130/fmr-0025-0008>

- Osmólska, M., Wrona, M., Trzcińska, M., & Nerín, C. (2022). Active and intelligent packaging technologies for food preservation. *Food Engineering Reviews*, 14(4), 570–590. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09319-6>
- Palanisamy, Y., Kadirvel, V., & Ganesan, N. D. (2025). Recent technological advances in food packaging: sensors, automation, and application. *Sustainable Food Technology*, 3, 161–180. <https://doi.org/10.1039/D4FB00296B>
- Pavelková, A. (2013). Time temperature indicators as devices intelligent packaging. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 61(1), 245–251. <https://doi.org/10.11118/actaun201361010245>
- Peng, J., & Wang, Y. (2025). Lignin nanoparticles in food packaging: A sustainable approach to material design and performance enhancement. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1659877. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1659877>
- Poyatos Racionero, E., Ros-Lis, J. V., Vivancos, J. L., & Martínez-Máñez, R. (2018). Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3398–3409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.075>
- Rodrigues, C., Souza, V. G. L., Coelho, I., & Fernando, A. L. (2021). Bio-Based Sensors for Smart Food Packaging Current Applications and Future Trends. *Sensors*, 21(6), 2148. <https://doi.org/10.3390/s21062148>
- Rönnow P [Internet]. (2016). (cited 2025 Dec 20). Available from: http://ccm.ytally.com/fileadmin/user_upload/Workshop/6.Workshop/Publications/R%C3%B6nnow.pdf
- Rossi, G., Conti, L., Fiorineschi, L., Marvasi, M., Monti, M., Rotini, F., Togni, M., & Barbari, M. (2020). A new eco friendly packaging material made of straw and bioplastic. *Journal of Agricultural Engineering*, 51, 185–191. <https://doi.org/10.4081/jae.2020.1088>
- Saba, N., Hameed Sultan, M. T., & Jawaid, M. (Eds.). (2020). Biopolymers and Biocomposites from Agro-Waste for Packaging Applications. Woodhead Publishing, Elsevier. ISBN 978-0-12-819953-4 / 978-0-12-820423-8.
- Said, N. S., & Lee, W. Y. (2025). Pectin-based active and smart film packaging: A comprehensive review of recent advancements in antimicrobial, antioxidant, and smart colorimetric systems for enhanced food preservation. *Molecules*, 30(5), 1144. <https://doi.org/10.3390/molecules30051144>
- Sani, I. K., Masoudpour Behabadi, M., Sani, M. A., Motalebinejad, H., Juma, A. S. M., Asdagh, A., Eghbaljoo, H., Khodaei, S. M., Rhim, J. W., & Mohammadi, F. (2023). Value added utilization of fruit and vegetable processing by products for the manufacture of biodegradable food packaging films. *Food Chemistry*, 405, 134964. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134964>

- Selvam, T., Rahman, N. M. M. A., Olivito, F., Ilham, Z., Ahmad, R., & Wan-Mohtar, W. A. A. Q. I. (2025). Agricultural waste-derived biopolymers for sustainable food packaging: Challenges and future prospects. *Polymers*, 17(14), 1897. <https://doi.org/10.3390/polym17141897>
- Sharma, C., Kundu, S., Singh, S., Saxena, J., Gautam, S., Kumar, A., & Pathak, P. (2025). From concept to shelf: engineering biopolymer-based food packaging for sustainability. *RSC Sustainability*, 3, 4992–5026. <https://doi.org/10.1039/D5SU00483G>
- Siciliano, S., Lopresto, C. G., & Lamonaca, F. (2024). From traditional packaging to smart bio-packaging for food safety: A review. *Euro Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 9, 1971–1986. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00627-8>
- Teixeira Costa, B. E., & Andrade, C. T. (2022). Natural polymers used in edible food packaging history, function and application trends as a sustainable alternative to synthetic plastic. *Polysaccharides*, 3(1), 32–58. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides3010002>
- Uthpala, T. G. G., Navaratne, S. B., Thibbotuwawa, A., Jayasinghe, M., & Wanigasinghe, R. S. (2021). Agricultural by product proteins: Emerging source for packaging applications. *International Journal of Food Science and Agriculture*, 5(3), 355–362. <https://doi.org/10.26855/ijfsa.2021.09.003>
- Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in Food Science & Technology*, 39(1), 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.009>
- Varghese, S. A., Pulikkalparambil, H., Promhuad, K., Srisa, A., Laurenza, Y., Jarupan, L., Nampitch, T., Chonhenchob, V., & Harnkarnsujarit, N. (2023). Renovation of Agro-Waste for Sustainable Food Packaging: A Review. *Polymers*, 15(3), 648. <https://doi.org/10.3390/polym15030648>
- Vasuki, M. T., Kadirvel, V., & Pejavara Narayana, G. (2023). Smart packaging—An overview of concepts and applications in various food industries. *Food Bioengineering*, 2(1), 25–41. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12038>
- Vilela, C., Kurek, M., Hayouka, Z., Röcker, B., Yildirim, S., Antunes, M. D. C., Nilsen-Nygaard, J., & Pettersen, M. K. (2018). A concise guide to active agents for active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.006>
- Wang, Z., Shi, X., Guo, J., Wang, L., Cao, M., Wang, S., & Chen, Y. (2025). Drop on demand printing of amine responsive fluorescence ratiometric sensor array for online monitoring meat freshness. *Food Chemistry: X*, 25, 102099. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102099>

- Wardana, A. A., Febrianto, N. A., Marcellino, V., Wigati, L. P., Nkede, F. N., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2025). Potency of coffee by-products as sustainable added material in bio/edible film development. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1667255. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1667255>
- Yıldız, E., Kuş, N., San, S. G., & Şumnu, S. G. (2024). Development of biodegradable active food packaging from agricultural wastes: Production, characterization, and application of films with banana peel and olive leaf extract. *Gıda*, 49, 1109–1125. <https://doi.org/10.15237/gida.gd24069>
- Yousefi, H., Su, H.-M., Imani, S. M., Alkhalidi, K., Filipe, C. D. M., & 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>
- Zhang, Y., Hu, Z., Xiang, H., Zhai, G., & Zhu, M. (2019). Fabrication of visual textile temperature indicators based on reversible thermochromic fibers. *Dyes and Pigments*, 162, 705–711. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.11.007>
- Zuo, J., Feng, Y., Wang, Y., & He, Q. (2022). RFID based sensing in smart packaging for food applications: A review. *Future Foods*, 6, 100198. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100198>