



Analisis Meta tentang Penggunaan Material dan Teknologi Ramah Lingkungan dalam Industri Pembungkusan Makanan

Muhammad Rio Rifansyah¹✉, Sadid Zaydan¹

⁽¹⁾Department of Industrial Engineering, University of Al Azhar Medan, Indonesia

DOI: [10.31004/jutin.v9i1.55685](https://doi.org/10.31004/jutin.v9i1.55685)

✉ Corresponding author:

[rio32878@gmail.com], [sadidzaydan@gmail.com]

Article Info

Kata kunci:
pembungkusan makanan berkelanjutan;
biopolimer;
kemasan biodegradable;
life cycle assessment;
ekonomi sirkular

Abstrak

Industri pembungkusan makanan menghadapi tantangan besar dalam menyeimbangkan fungsi perlindungan produk pangan dengan tuntutan keberlanjutan lingkungan, seiring meningkatnya limbah plastik dan food waste secara global. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, membandingkan, dan mengevaluasi material serta teknologi pembungkusan makanan ramah lingkungan guna mendukung transisi menuju sistem kemasan yang berkelanjutan. Metode yang digunakan adalah meta-analisis terhadap lebih dari 200 publikasi ilmiah periode 2018–2025, yang dipadukan dengan systematic literature review dan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) berbasis standar ISO 14040/14044. Analisis mencakup biopolimer berbasis polisakarida dan protein, Polylactic Acid (PLA), Polyhydroxyalkanoates (PHA), serta material nanokomposit dan teknologi smart packaging. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material biodegradable dan nanokomposit mampu meningkatkan sifat mekanik dan kemampuan penghalang, serta berpotensi menurunkan dampak lingkungan dibandingkan plastik konvensional, meskipun masih terdapat trade-off berupa konsumsi sumber daya, biaya produksi, dan ketergantungan pada sistem pengelolaan akhir masa pakai.

Keywords:
sustainable food packaging;
biopolymers;
biodegradable packaging;
life cycle assessment;
circular economy

Abstract

The food packaging industry faces significant challenges in balancing food protection performance with increasing environmental sustainability demands, driven by the rapid growth of plastic waste and global food loss. This study aims to identify, compare, and assess sustainable food packaging materials and technologies to support the transition toward environmentally responsible packaging systems. A meta-analysis of more than 200 peer-reviewed publications from 2018–2025 was conducted, integrating a systematic literature review with Life Cycle Assessment (LCA) based on ISO 14040/14044 standards. The analysis covered polysaccharide- and protein-based biopolymers, Polylactic Acid (PLA),

1. PENDAHULUAN

Industri pembungkusan makanan menghadapi tantangan signifikan dalam menyeimbangkan fungsi perlindungan produk dengan tuntutan keberlanjutan lingkungan. Setiap tahun, lebih dari satu miliar ton makanan terbuang, sementara sekitar 79% limbah plastik berakhir di tempat pembuangan akhir, yang berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan jangka panjang. Konsumsi global plastik untuk pembungkusan diproyeksikan meningkat tiga kali lipat pada tahun 2060, menciptakan urgensi untuk mengembangkan solusi pembungkusan yang berkelanjutan. Kondisi ini menegaskan urgensi pengembangan sistem pembungkusan makanan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Chaudhary et al., 2022).

Penelitian meta-analisis ini mengidentifikasi dan menganalisis material pembungkusan makanan ramah lingkungan yang dikelompokkan ke dalam lima kategori utama. Pertama, biopolimer berbasis polisakarida, seperti pati selulosa dan kitosan menunjukkan potensi sebagai alternatif biodegradable yang efektif (Comparative, 2023). Kedua, material berbasis protein, termasuk gelatin dan *protein whey* memiliki kemampuan pembentukan lapisan film yang baik. Ketiga, *Polyhydroxyalkanoates* (PHA) dilaporkan mampu mengurangi dampak lingkungan hingga 50% dibandingkan plastik berbasis fosil, dengan peningkatan efisiensi produksi mencapai 60% (Zufri et al., 2025). Keempat, *Polylactic Acid* (PLA) merupakan biopolimer yang paling matang secara komersial dan telah banyak diaplikasikan dalam industri pembungkusan (Kumar et al., 2022). Kelima, material terkomposit yang mengombinasikan biopolimer dengan nanopartikel dan nanoselulosa serta pengembangan teknologi inovatif seperti film yang dapat dimakan dan kemasan aktif-cerdas dengan indikator kerusakan pangan secara waktu nyata (Cao & Shahraki, 2023). Penelitian ini membandingkan sifat mekanik dan sifat penghalang, mengevaluasi dampak lingkungan secara menyeluruh melalui pendekatan *Life Cycle Assessment*, serta menganalisis kelayakan ekonomi dari berbagai solusi pembungkusan (Savov et al., 2023).

Perkembangan pembungkusan ramah lingkungan telah mengalami evolusi yang signifikan melalui empat fase. Fase pertama (2010–2015) berfokus pada pengembangan material yang dapat terurai secara hayati, dengan penelitian laboratorium yang masih terbatas pada karakterisasi sifat fisik (Maulana et al., 2026). Fase kedua (2015–2020) menunjukkan peralihan menuju material komposit, dengan peningkatan sifat mekanik hingga sekitar 40% melalui penguatan nanoselulosa (Siregar et al., 2024). Fase ketiga (2020–2023) menandai perkembangan menuju sistem pembungkusan aktif dan cerdas yang mengintegrasikan senyawa antimikroba alami, antioksidan, serta indikator kerusakan produk, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi secara waktu nyata (Ratshoshi et al., 2024). Selanjutnya, fase kontemporer (2023–2025) menunjukkan pendekatan yang lebih terintegrasi dengan mempertimbangkan keberlanjutan sepanjang daur hidup material, melalui penerapan penilaian daur hidup (*Life Cycle Assessment*) dan prinsip ekonomi sirkular. Keterbaharuan penelitian meta-analisis ini meliputi analisis sinergi multi-material yang bertujuan mengidentifikasi kombinasi optimal antara biopolimer, nanopartikel, dan antimikroba alami. Selain itu, penelitian ini menyajikan penilaian keberlanjutan terintegrasi yang mencakup aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi, dengan mempertimbangkan jejak karbon, kelayakan ekonomi, serta kepatuhan terhadap regulasi (Landscape et al., 2022).

Penelitian ini juga mengkaji teknologi yang sedang berkembang, seperti plasma dingin untuk modifikasi permukaan material, serta penerapan kecerdasan buatan dan *Internet of Things* dalam pembungkusan cerdas. Lebih lanjut, disusun pula kerangka adopsi khusus bagi usaha kecil dan menengah, yang membedakan penelitian ini dari kajian-kajian sebelumnya (Ahmad et al., 2025).

2. METODE

2.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan meta-analisis dengan mensintesis sudah lebih dari 200 studi kontemporer untuk mengidentifikasi material dan teknologi pembungkusan ramah lingkungan terbaik saat ini sambil memetakan pathway komprehensif untuk inovasi masa depan. Dengan mengintegrasikan analisis trade-offs sistematis antara performa fungsional versus dampak lingkungan, biaya produksi versus keberlanjutan, dan skalabilitas versus kustomisasi, penelitian ini dirancang untuk memberikan kontribusi signifikan bagi akademisi, industri, dan pembuat kebijakan dalam mentransisikan sektor pembungkusan menuju keberlanjutan. Penelitian tidak hanya mengidentifikasi material dan teknologi terbaik tetapi juga memetakan pathway inovasi dalam menciptakan sistem pembungkusan yang selaras dengan kebutuhan lingkungan, sosial, dan ekonomi global,

dengan mempertimbangkan integrasi regulasi internasional dan praktik berkelanjutan dalam seluruh supply chain (P. Wang et al., 2023).

2.2 Pencarian dan Seleksi Literatur

Lingkup penelitian ini mencakup lima kategori material utama, yaitu biopolimer berbasis polisakarida (pati, selulosa, dan kitosan), material berbasis protein (gelatin dan whey protein), Polyhydroxyalkanoates (PHA), Polylactic Acid (PLA), serta material nanokomposit dengan teknologi smart packaging. Pencarian Pemilihan basis data Scopus, Web of Science, dan Google Scholar dilakukan karena ketiganya menyediakan cakupan literatur ilmiah yang luas, kredibel, dan saling melengkapi, sehingga meminimalkan risiko bias publikasi (Moises et al., 2020). Pembatasan pada publikasi peer-reviewed periode 2018–2025 dan berbahasa Inggris bertujuan memastikan relevansi, kebaruan, serta ketersediaan data kuantitatif empiris yang dapat dianalisis secara meta-analitik. Proses screening oleh tiga reviewer independen dengan Cohen's kappa $\geq 0,70$ diterapkan untuk menjamin konsistensi seleksi dan meningkatkan reliabilitas metodologis sesuai protokol PRISMA (Tian & He, 2020).

2.3 Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment / LCA)

menggunakan metodologi ReCiPe 2016 (H) Midpoint dengan 18 kategori dampak, mencakup perubahan iklim, konsumsi air, penggunaan lahan, dan ekotoksitas. Data inventori berasal dari Ecoinvent 3.5, AGRIBALYSE, dan data primer produsen. Skenario akhir masa pakai dimodelkan dengan tiga opsi: landfill (methane capture 75%), incineration (energy recovery 80%), dan recycling (efisiensi 85%). Uncertainty analysis dilakukan menggunakan Monte Carlo simulation 10.000 iterasi dengan tornado diagram untuk mengidentifikasi titik kritis (hotspots) (Bol, 2023).

2.4 Analisis Tambahan: Food Waste, Ekonomi, dan Regulasi

Analisis LCA tersebut dilengkapi dengan integrasi dimensi food waste melalui evaluasi efektivitas kemasan dalam memperpanjang umur simpan, menjaga integritas struktural, dan meningkatkan technical emptiability. Analisis ekonomi dilakukan secara paralel menggunakan pendekatan full cost accounting dengan tingkat diskonto 3–5%. Aspek regulasi juga dipertimbangkan melalui peninjauan EU Food Contact Materials Directive, regulasi FDA, serta evaluasi terhadap non-intentionally added substances (NIAS) (F. Wang et al., 2022).

Meta-analisis dan Validasi

- Meta-analisis dilakukan menggunakan model random-effects untuk mengakomodasi heterogenitas antar studi yang timbul akibat perbedaan jenis material, kategori pangan, dan konteks wilayah penelitian.
- Tahap pertama dalam meta-analisis adalah perhitungan ukuran efek dalam bentuk log response ratio (lnRR) untuk setiap variabel kontinu yang relevan.
- Tahap berikutnya adalah analisis subkelompok yang dilakukan berdasarkan jenis material, kategori pangan, dan wilayah geografis guna mengidentifikasi variasi efek antar kelompok studi.
- Selanjutnya, tingkat heterogenitas antar studi dievaluasi menggunakan uji Cochran's Q dan statistik I^2 . Hasil sintesis kuantitatif dari meta-analisis kemudian divisualisasikan dalam bentuk forest plot (di gunakan untuk membuat grafik).
- Potensi bias publikasi dianalisis melalui inspeksi visual funnel plot dan dikonfirmasi secara statistik menggunakan uji regresi Egger.
- Sebagai tahap akhir, validasi hasil dilakukan melalui sensitivity analysis, perbandingan dengan temuan studi terdahulu, serta konsultasi ahli yang melibatkan pemangku kepentingan dari sektor manufaktur, industri pangan, dan lembaga regulasi (Donkor et al., 2023).

2.5 Keterbatasan Penelitian dan Implikasi

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain keterbatasan geografis data inventori siklus hidup, ketidakpastian dalam kuantifikasi food waste, keterbatasan data pada material yang masih berkembang, serta minimnya informasi terkait perilaku konsumen. Meskipun demikian, pendekatan metodologis yang digunakan memungkinkan identifikasi trade-offs keberlanjutan pada sistem pembungkusan makanan dan memberikan dasar bagi pengembangan solusi yang mendukung transisi menuju circular economy yang berkelanjutan (Wójcik et al., 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 literature review

Penelitian ini merupakan kajian literatur yang merangkum 23 publikasi ilmiah terkait penggunaan material dan teknologi ramah lingkungan dalam industri pembungkusan makanan, yang telah terbukti memberikan kontribusi signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan dan efisiensi sumber daya. Artikel-artikel tersebut diambil dari berbagai sumber nasional dan internasional. Analisis dilakukan berdasarkan identitas artikel, tahun publikasi, judul penelitian, dan fokus penelitian yang kemudian dirangkum secara sistematis dalam Refensi.

3.2 Kinerja dan Sifat Fungsional Material

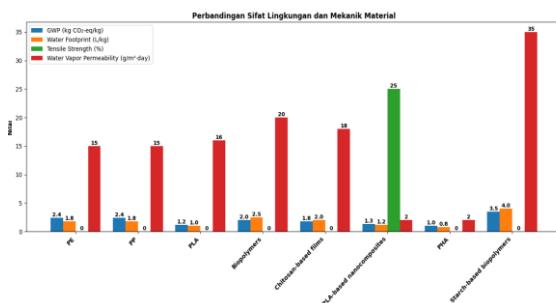
Penelitian komprehensif mengenai material pembungkus ini disusun berdasarkan peninjauan terhadap lima artikel ilmiah yang relevan dan dipublikasikan dalam beberapa tahun terakhir, dengan fokus pada kinerja lingkungan, sifat fungsional material makanan berkelanjutan menunjukkan suatu kondisi yang kompleks dengan kompromi yang signifikan kinerja lingkungan, sifat fungsional, dan kelayakan ekonomi (Mkhari et al., 2025).

Polietilen (PE) dan polipropilen (PP) menghasilkan emisi gas rumah kaca sebesar 1,8–2,4 kg CO₂-eq per kilogram kemasan, sementara polylactic acid (PLA) menunjukkan potensi pengurangan emisi karbon sebesar 30–50% ketika diproduksi dari sumber terbarukan. Namun, biopolimer berbasis polisakarida menunjukkan jejak air yang lebih tinggi karena bergantung pada proses pertanian yang intensif, memerlukan 40,3 liter air per kilogram produk, yang mengindikasikan kompromi fundamental antara pengurangan jejak karbon dengan peningkatan konsumsi air. PLA murni menunjukkan sifat penghalang oksigen yang baik, namun permeabilitas uap air yang tinggi (14–20 g/(m²·hari)) membatasi aplikasinya untuk produk yang sensitif terhadap kelembapan (Mihai et al., 2025).

Penambahan nanopartikel secara signifikan meningkatkan performa ini, dengan penambahan 3 wt% nanoclay yang mampu mengurangi permeabilitas uap air hingga 28% serta laju transmisi oksigen sebesar 21%. Nanocellulose yang berasal dari ampas tebu (sugarcane bagasse) menawarkan keunggulan sebagai bahan baku terbarukan, dengan dampak lingkungan yang relatif lebih rendah, khususnya terkait penggunaan air dan potensi ekotoksitas.

Film berbasis kitosan menunjukkan aktivitas antimikroba yang sangat signifikan dengan zona hambat bakteri sebesar 7–16 mm terhadap *E. coli* dan *S. aureus*. Ketika difortifikasi dengan nanopartikel perak pada konsentrasi 2 wt%, umur simpan roti dapat diperpanjang dari 5 menjadi 38 hari pada suhu penyimpanan 25°C. Kombinasi kitosan dengan nanoselulosa dan minyak atsiri menunjukkan efek sinergis yang menghasilkan peningkatan sifat penghalang sebesar 35% serta aktivitas antimikroba yang efektif menghambat pertumbuhan bakteri pembusuk. Minyak atsiri dari Aloysia citrodora pada konsentrasi 1 wt% dalam film kitosan/nanoselulosa mampu menghambat oksidasi lipid dan pertumbuhan bakteri hingga hari ke-9 penyimpanan (Sarkhel et al., 2025).

Nanokomposit berbasis PLA dengan zinc oxide nanoparticles menunjukkan peningkatan sifat, dengan kekuatan tarik meningkat sebesar 25–35% serta daya hambat terhadap air yang meningkat secara signifikan. Polyhydroxyalkanoate (PHA) menunjukkan potensi untuk mengurangi dampak lingkungan hingga 50% dibandingkan petroleum-based plastics sambil mempertahankan functional properties yang memadai. Namun, biopolimer berbasis pati menunjukkan nilai GWP terendah (sekitar 5,2 kg CO₂-eq/kg) tetapi memiliki sensitivitas kelembapan yang tinggi dengan water vapor permeability sebesar 25–35 g/(m²·hari), sehingga memerlukan penguatan komposit yang pada akhirnya meningkatkan environmental footprint-nya. Untuk memperjelas perbedaan kinerja lingkungan dan sifat fungsional antar material kemasan, hasil perbandingan tersebut disajikan dalam bentuk diagram batang pada Gambar 4



Gambar 1. Perbandingan Dampak Lingkungan dan Performa Material Pembungkusan Makanan Berkelanjutan

Berdasarkan Gambar 4 di atas diagram batang tersebut membandingkan kinerja lingkungan dan sifat fungsional beberapa biopolimer dan plastik konvensional berdasarkan lima parameter, yaitu Potensi Pemanasan Global (GWP), jejak air, kekuatan tarik, dan permeabilitas uap air. Penyajian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan biopolimer sebagai alternatif ramah lingkungan dibandingkan plastik konvensional (PE dan PP) dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dan performa material. Berikut ini adalah Penyajian data tabel berdasarkan pada hasil visualisasi diagram batang di atas.

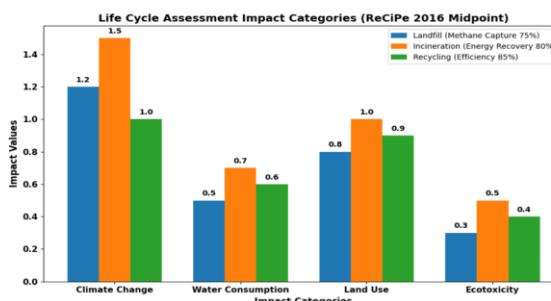
Tabel 1. Data Dampak Lingkungan dan Performa Material Pembungkusan Makanan Berkelanjutan

Material	GWP (kg CO ₂ -eq/kg)	Water Footprint (liters/kg)	Tensile Strength (%)	Water Vapor Permeability (g/(m ² ·day))
PE	2.4	1.8	0	15
PP	2.4	1.8	0	15
PLA	1.2	1.0	0	16
Biopolymers	2.0	2.5	0	20
Chitosan-based films	1.8	2.0	0	18
PLA-based nanocomposites	1.3	1.2	25	2
PHA	1.0	0.8	0	2
Starch-based biopolymers	3.5	4.0	0	35

Berdasarkan Tabel 4 di atas ini menyajikan perbandingan material pembungkus makanan berdasarkan dampak lingkungan, yaitu Global Warming Potential dan water footprint, serta kinerja material berupa tensile strength dan water vapor permeability. Tujuan penyajian tabel ini adalah untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai perbedaan karakteristik setiap material sehingga dapat memudahkan penilaian dan pemilihan material kemasan yang memiliki keseimbangan terbaik antara keberlanjutan lingkungan dan performa fungsional. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa tidak ada material yang unggul pada seluruh aspek keberlanjutan dan performa fungsional secara bersamaan. Setiap material memiliki trade-off antara dampak lingkungan, sifat mekanik, dan kemampuan perlindungan pangan, sehingga pemilihannya perlu disesuaikan dengan jenis produk dan kondisi penggunaan. Temuan ini menegaskan pentingnya rekayasa dan kombinasi material untuk mencapai keseimbangan antara kinerja dan keberlanjutan lingkungan.

3.3 Dampak Lingkungan, Risiko, dan Perilaku Degradasi

Penambahan nanoparticles mengintroduksi uncertainty dalam environmental assessment mengenai potential migration ke dalam makanan yang dikemas dan environmental leakage. Silver nanoparticles dapat migrate hingga 0,048 mg/L dalam acidic food simulant meskipun masih di bawah regulatory thresholds, sementara zinc oxide nanoparticles menunjukkan minimal migration <0,01 mg/dm², menunjukkan bahwa oxide ceramic nanoparticles memiliki better containment stability. Selain risiko migrasi nanopartikel, evaluasi dampak lingkungan secara menyeluruh dilakukan melalui pendekatan Life Cycle Assessment (LCA), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Dampak Kategori Penilaian Siklus Hidup

Gambar 5 di atas menyajikan perbandingan dampak lingkungan dari tiga metode pengelolaan sampah, yaitu landfill, insinerasi, dan daur ulang, berdasarkan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dengan kategori dampak ReCiPe 2016 Midpoint. Tujuan penyajian gambar ini adalah untuk menunjukkan perbedaan tingkat dampak masing-masing metode terhadap perubahan iklim, konsumsi air, penggunaan lahan, dan ekotoksisitas,

sehingga dapat menjadi dasar dalam memilih metode pengelolaan sampah yang lebih ramah lingkungan. Berikut ini adalah Penyajian data tabel di didasarkan pada hasil visualisasi diagram batang di atas.

Tabel 2. Perbandingan Dampak Kategori Penilaian Siklus Hidup

Kategori Dampak	Timbunan (Methane Capture 75%)	Pembakaran (Energy Recovery 80%)	Daur Ulang (Efisiensi 85%)
Perubahan Iklim	1.2	1.5	1.0
Konsumsi Air	0.5	0.7	0.6
Penggunaan Lahan	0.8	1.0	0.9
Ekotoksitas	0.3	0.5	0.4

Berdasarkan Tabel 6 di atas telah menunjukkan bahwa perbandingan dampak lingkungan dari tiga metode pengelolaan sampah, yaitu timbunan, pembakaran, dan daur ulang, pada kategori perubahan iklim, konsumsi air, penggunaan lahan, dan ekotoksitas. Nilai pada tabel memperlihatkan bahwa metode pembakaran menghasilkan dampak paling tinggi pada seluruh kategori, sedangkan daur ulang cenderung memiliki dampak yang lebih rendah dibandingkan metode lainnya. Penyajian tabel ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang jelas mengenai perbedaan dampak antar metode sebagai dasar pertimbangan dalam pemilihan pengelolaan sampah yang lebih ramah lingkungan.

PLA dalam composting environment pada suhu 58°C menunjukkan disintegration rate 100% dalam 14-180 hari, sementara Polyhydroxyalkanoate terdegradasi sepenuhnya dalam 6-10 minggu di composting dan 3-6 bulan dalam marine environments. Namun, landfill scenario modeling menunjukkan bahwa material "biodegradable" menunjukkan minimal degradation dalam kondisi anaerob, dengan degradation rates <1% per tahun untuk PLA dan <5% per tahun untuk PHA, mengindikasikan bahwa manfaat lingkungan hanya dapat direalisasikan melalui proper composting management. Hal ini menegaskan bahwa manfaat lingkungan dari material biodegradable sangat bergantung pada sistem pengelolaan akhir yang tepat, khususnya ketersediaan infrastruktur pengomposan yang memadai.

3.4 Aspek Ekonomi dan Implementasi

Life Cycle Costing analysis menunjukkan bahwa PLA production cost berkisar 1,8-2,5 USD per kilogram pada large-scale manufacturing, dibandingkan dengan PE/PP pada 0,8-1,2 USD/kg, menghasilkan cost premium sebesar 50-150%. Penambahan nanoparticles atau active compounds meningkatkan biaya hingga tambahan 0,5-1,5 USD/kg. Economies of scale menunjukkan bahwa biaya PLA dapat turun menjadi 1,2-1,5 USD/kg dengan volume produksi > 500,000 ton/tahun, Survei konsumen menunjukkan bahwa kesadaran keberlanjutan meningkat signifikan, dengan 65-75% konsumen menunjukkan willingness to pay price premium untuk biodegradable packaging. Namun, perilaku pembelian aktual menunjukkan kesenjangan signifikan dengan hanya 15-25% adopsi pasar. Education initiatives dan clear labeling dapat meningkatkan consumer adoption hingga 35-40% (Ramadhan et al., 2026).

3.5 kesenjangan riset & implikasi masa depan

Penelitian ini mengidentifikasi *critical knowledge gaps* dalam pengumpulan data empiris terkait perilaku konsumen aktual pada rantai distribusi dunia nyata, persistensi lingkungan nanopartikel dalam ekosistem perairan, degradasi material pada kondisi nyata di *landfill* campuran dan lingkungan tanah, serta aspek sosial-ekonomi yang mencakup kondisi tenaga kerja dan kesetaraan akses terhadap teknologi. Transisi menuju kemasan pangan yang benar-benar berkelanjutan membutuhkan pendekatan menyeluruh yang menggabungkan inovasi teknologi, dukungan kebijakan, peningkatan literasi konsumen, serta kolaborasi antar pemangku kepentingan di sepanjang rantai nilai untuk mewujudkan penerapan ekonomi sirkular yang efektif (Siregar et al., 2020).

Meskipun penelitian terkait kemasan pangan berkelanjutan terus berkembang, kajian yang ada masih bersifat terfragmentasi dan belum mampu menggambarkan kondisi implementasi secara utuh. Sebagian besar studi berfokus pada pengembangan material, sementara perilaku konsumen aktual dalam rantai distribusi nyata, persistensi lingkungan nanopartikel, serta mekanisme degradasi material pada kondisi *landfill* dan tanah yang sesungguhnya masih belum terdokumentasi secara memadai. Selain itu, aspek sosial-ekonomi, termasuk kondisi tenaga kerja dan kesetaraan akses terhadap teknologi, jarang diintegrasikan dalam evaluasi keberlanjutan. Keterbatasan ini menegaskan adanya kebutuhan penelitian yang mengintegrasikan aspek teknis, lingkungan, dan sosial secara simultan untuk menghasilkan pemahaman yang lebih realistik dan mendukung penerapan ekonomi sirkular yang efektif dalam sistem kemasan pangan (Zufri et al., 2025).

4. KESIMPULAN

Pendekatan meta-analisis dan *Life Cycle Assessment*, dan hasilnya menunjukkan bahwa *biopolimer* berbasis polisakarida, protein, PLA, PHA, serta material nanokomposit dan *smart packaging* secara konsisten mampu mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan performa kemasan dibandingkan plastik konvensional, meskipun masing-masing masih memiliki keterbatasan dan trade-off tertentu. Temuan ini menegaskan bahwa keberlanjutan kemasan pangan tidak dapat dicapai melalui satu jenis material tunggal, melainkan melalui pemilihan dan rekayasa material yang kontekstual terhadap jenis pangan, kondisi penggunaan, serta sistem pengelolaan akhir masa pakai. Bagi pembaca umum dan pelaku industri, penelitian ini memberikan dasar ilmiah bahwa adopsi kemasan ramah lingkungan perlu disertai dukungan infrastruktur pengomposan, daur ulang, dan informasi yang jelas kepada konsumen agar manfaat lingkungannya dapat terealisasi. Sementara itu, bagi peneliti tingkat lanjut, studi ini merekomendasikan pengembangan penelitian terintegrasi lintas disiplin yang mencakup skala produksi industri, konsistensi regulasi, perilaku konsumen nyata, serta integrasi teknologi digital dan prinsip ekonomi sirkular untuk mempercepat transisi menuju sistem pembungkusan makanan yang benar-benar berkelanjutan.

5. REFERENSI

- Ahmad, F., Saputra, D. K., Apriliana, M., Abibah, L., & Abidin, N. (2025). *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry SINTESIS , KARAKTERISASI , DAN APLIKASI POLIANILIN SEBAGAI POLIMER KONDUKTIF DALAM TEKNOLOGI MODERN: A REVIEW (SYNTHESIS , CHARACTERIZATION , AND APPLICATIONS OF POLYANILINE AS A CONDUCTIVE POLYMER IN MODERN TECHNOLOGIES: A REVIEW)*. 8(2), 66–90.
- Bol, A. (2023). *Listeria in Food: Prevalence and Control*. 5–6.
- Cao, B., & Shahraki, A. A. (2023). *Planning of Transportation Infrastructure Networks for Sustainable Development with Case Studies in Chabahar*. 1–15.
- Chaudhary, V., Bangar, S. P., Thakur, N., & Trif, M. (2022). *Recent Advancements in Smart Biogenic Packaging: Reshaping the Future of the Food Packaging Industry*.
- Comparative, A. A. (2023). *Development of Films from Spent Coffee Grounds ' Polysaccharides Crosslinked with Calcium Ions and Properties and Biodegradability*.
- Donkor, L., Kontoh, G., Yaya, A., Kwame, J., & Apalangya, V. (2023). Bio-based and sustainable food packaging systems: relevance , challenges , and prospects. *Applied Food Research*, 3(2), 100356. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100356>
- Kumar, A., Singh, R. P., Kumar, I., Yadav, P., Singh, S. K., Singh, P. K., Gupta, R. K., & Singh, S. M. (2022). *Algal Metabolites Can Be an Immune Booster against COVID-19 Pandemic*. 1–17.
- Landscape, Irpinia, & Southern, G. (2022). *Geosite Assessment as a Tool for the Promotion and Conservation of Irpinia Landscape Geoheritage (Southern Italy)*. 1–22. <https://doi.org/10.3390/resources11100097>
- Maulana, A., Rifanza, M. H., & Rambe, J. S. (2026). *JUTIN: Jurnal Teknik Industri Terintegrasi Development of Conductive Polymer-Based Materials for Flexible Integrated Electronic Applications*. 9(1).
- Mihai, Sonia, Oancea, & Florin. (2025). *An Overview of Bio-Based Polymers with Potential for Food Packaging Applications*. 1–30.
- Mkhari, Tshamisane, Adeyemi, & O, J. (2025). *Recent Advances in the Fabrication of Intelligent Packaging for Food Preservation: A Review*. 1–49.
- Moises, D., Lopez, B., & Ahmad, R. (2020). *Tensile Mechanical Behaviour of Multi-Polymer Sandwich Structures via Fused Deposition Modelling*.
- Ramadhan, G., Riawan, I. A., & Naim, R. D. (2026). *JUTIN: Jurnal Teknik Industri Terintegrasi Analisis Tren Harga Aluminium , Tembaga , dan Nikel 2015 – 2025 serta Implikasinya terhadap Biaya Material Manufaktur*. 9(1). <https://doi.org/10.31004/jutin.v9i1.55298>
- Ratshoshi, B. K., Farzad, S., & Johann, F. G. (2024). *Food and Bioproducts Processing A techno-economic study of Polybutylene adipate terephthalate (PBAT) production from molasses in an integrated sugarcane biorefinery*. 145(January), 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.01.011>
- Sarkhel, S., Kaur, S., Das, R., & Sharma, A. (2025). *Sustainable Food Technology and natural extracts: sustainable solutions and*. 12. <https://doi.org/10.1039/d5fb00689a>
- Savov, V., Antov, P., Zhou, Y., & Bekhta, P. (2023). *Eco-Friendly Wood Composites: Design , Characterization*. 1–6.
- Siregar, Z. H., Harahap, U. N., & Zurairah, M. (2020). *Perencanaan Bahan Baku Menggunakan Metode Min-Max Pada PT . TALENTA Conference Series Perencanaan Bahan Baku Menggunakan Metode Min-Max Pada PT . Pacific*

- Palmindo Industri*. 3(2). <https://doi.org/10.32734/ee.v3i2.1073>
- Siregar, Z. H., Siregar, R., Prinsi Rigitta, N., Puspita, R., Refiza, Zurairah, M., Purba, I. G., & Tanjung, J. H. S. (2024). Pengembangan Aliran Sungai Sebagai Potensi Pembangkit Listrik Mikro Hidro Serta Edukasi dan Akulturasi di Desa Meranti Tengah Dusun Batu Rangin Kecamatan Pintu Pohan Meranti Kabupaten Tobasa. *Jurnal Deputi*, 4(1), 264–269. <https://doi.org/10.54123/deputi.v4i1.325>
- Tian, D., & He, J. (2020). *Control of Macromolecule Chains Structure in a Nanofiber*.
- Wang, F., Jin, M., Li, J., Zhang, Y., & Chen, J. (2022). *Profound Impact of Economic Openness and Digital Economy towards a Sustainable Development: A New Look at RCEP Economies*.
- Wang, P., Qiao, H., Xue, C., & Feng, Q. (2023). *Prediction of Water Resistance of Magnesium Oxychloride Cement Concrete Based upon Hybrid-BP Neural Network*.
- Wójcik, A., Ślawiński, Łukasz, & Banaszek, Ł. (2024). Innovations in Food Packaging: From Bio-Based Materials to. *processses*, 12, 2085. <https://doi.org/10.3390/pr12102085>
- Zufri, Ir., & Hasrudy Siregar, S.T., M.Eng., C. E. (2025). *Pengantar Teknik Mesin dan Industri* (Edisi Pert). Yayasan Tri Edukasi Ilmiah Komplek Delta Emporio No.227, Jalan Raya Pakan Kamis, Gadut, Tilatang Kamang, Kab. Agam, Sumatera Barat.