

Studi Polimer Biodegradable untuk Pengemasan Ramah Lingkungan

Jesica Maulidia^{1*}, Fitriani Azizah²

^{1,2} Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram, Indonesia

* Corresponding author : jmaulidia@gmail.com

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history Received : January 09, 2025 Revised : January 12, 2025 Accepted : February 29, 2025 Published : March 10, 2025 Keywords Biodegradable Polymers Eco-Friendly Packaging Alternative Plastics Biological Degradation Sustainable Materials  License by CC-BY-SA Copyright © 2025, The Author(s).	The growing awareness of the environmental impacts caused by conventional plastic waste has driven the development of more environmentally friendly alternative materials, one of which is biodegradable polymers. This study aims to explore the potential of biodegradable polymers as sustainable and eco-friendly packaging materials. Biodegradable polymers have the ability to decompose naturally through microbial activity under specific environmental conditions, thereby reducing the accumulation of persistent plastic waste. This study presents a literature review of various types of biodegradable polymers, such as polylactic acid (PLA), polyhydroxyalkanoates (PHA), thermoplastic starch (TPS), and polybutylene succinate (PBS), as well as their applications in the packaging industry. Additionally, the study discusses the challenges faced in implementing biodegradable polymers, including relatively high production costs, limitations in mechanical and thermal properties, and specific degradation conditions. Nevertheless, with ongoing technological advancements and increasing consumer awareness of environmental issues, the use of biodegradable polymers in packaging shows promising prospects. This study concludes that biodegradable polymers represent a potential solution to reduce the environmental impact of conventional plastic use, although further research is required to enhance their performance and production efficiency.
<i>How to cite:</i> Maulidia, J. & Azizah, F. (2025). Studi Polimer Biodegradable untuk Pengemasan Ramah Lingkungan. <i>Journal of Science and Mathematics Education</i>, 1(1). 10-15. https://doi.org/10.70716/josme.v1i1.162	

PENDAHULUAN

Isu pencemaran lingkungan akibat penggunaan plastik konvensional telah menjadi perhatian global dalam beberapa dekade terakhir. Plastik berbasis minyak bumi bersifat non-biodegradable, sehingga limbahnya dapat bertahan di lingkungan selama ratusan tahun dan menyebabkan kerusakan ekosistem secara signifikan. Menurut data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Indonesia menghasilkan lebih dari 6 juta ton sampah plastik setiap tahunnya, dan sebagian besar di antaranya berasal dari sektor pengemasan (Putri et al., 2020). Hal ini mendorong para peneliti dan pelaku industri untuk mencari alternatif material pengganti plastik yang ramah lingkungan, salah satunya adalah polimer biodegradable.

Polimer biodegradable merupakan jenis polimer yang dapat terurai secara alami melalui aktivitas mikroorganisme seperti bakteri dan jamur, tanpa menghasilkan residu berbahaya. Kemampuan ini menjadikan polimer biodegradable sebagai kandidat ideal untuk bahan pengemasan yang berkelanjutan. Penggunaan material ini dapat meminimalisasi jejak karbon, mengurangi volume sampah, serta mendukung kebijakan zero waste yang tengah dikampanyekan oleh banyak negara, termasuk Indonesia (Sari & Nugroho, 2021).

Dalam pengembangannya, terdapat berbagai jenis polimer biodegradable yang telah diteliti dan dikembangkan untuk aplikasi pengemasan. Di antaranya adalah polilaktida (PLA), poli hidroksi alkanoat (PHA), pati termoplastik (TPS), dan polibutilena suksinat (PBS). Setiap jenis polimer tersebut memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing, baik dari segi sifat mekanik, stabilitas termal, maupun kompatibilitas lingkungan. Misalnya, PLA dikenal memiliki transparansi tinggi dan dapat diproses menggunakan peralatan plastik konvensional, namun memiliki kelemahan pada kekuatan impak dan kelenturannya (Wijaya et al., 2022).

Selain faktor teknis, ketersediaan bahan baku juga menjadi aspek penting dalam pengembangan polimer biodegradable. Sebagian besar polimer ini berbasis pada sumber daya alam terbarukan, seperti pati dari jagung, singkong, atau kentang. Hal ini memberikan nilai tambah karena tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap minyak bumi, tetapi juga mendorong pemanfaatan hasil pertanian lokal. Di Indonesia, pemanfaatan pati dari umbi-umbian sebagai bahan baku TPS telah diteliti dan menunjukkan potensi ekonomi yang menjanjikan (Halim et al., 2019).

Namun demikian, tantangan dalam pengaplikasian polimer biodegradable tidaklah sedikit. Salah satu hambatan utama adalah biaya produksi yang masih relatif tinggi dibandingkan plastik konvensional. Hal ini disebabkan oleh proses sintesis yang lebih kompleks, harga bahan baku, serta keterbatasan infrastruktur daur ulang atau fasilitas kompos industri di banyak daerah (Ramadhani & Prasetyo, 2021). Oleh karena itu, perlu dilakukan inovasi dalam proses produksi agar biaya dapat ditekan tanpa mengorbankan kualitas produk.

Selain biaya, karakteristik fisik dan mekanik polimer biodegradable juga masih menjadi isu penting. Beberapa jenis polimer biodegradable menunjukkan sifat yang kurang tahan terhadap kelembaban, suhu tinggi, dan tekanan mekanik yang tinggi. Hal ini menjadi hambatan terutama dalam industri pengemasan makanan yang memerlukan perlindungan ekstra untuk menjaga kualitas produk (Yuliani et al., 2023). Untuk itu, modifikasi struktur kimia dan penambahan aditif ramah lingkungan sedang banyak dikembangkan untuk meningkatkan performa material ini.

Di sisi lain, perkembangan teknologi telah memberikan angin segar dalam penyempurnaan karakteristik polimer biodegradable. Inovasi dalam bidang nanoteknologi dan rekayasa biomaterial memungkinkan pengembangan komposit biodegradable dengan sifat yang lebih unggul. Penambahan nanopartikel seperti nano-selulosa atau nano-perak terbukti dapat meningkatkan ketahanan mekanik dan aktivitas antimikroba material kemasan (Fitriani et al., 2020). Ini membuka peluang baru untuk aplikasi yang lebih luas di berbagai sektor industri.

Kebijakan pemerintah juga berperan besar dalam mendorong adopsi polimer biodegradable. Pemerintah Indonesia melalui Peraturan Menteri LHK Nomor P.75/Menlhk/Setjen/Kum.1/10/2019 tentang Peta Jalan Pengurangan Sampah oleh Produsen mendorong industri untuk mengembangkan kemasan yang mudah terurai. Selain itu, insentif fiskal dan dukungan riset turut diperlukan agar teknologi ini dapat bersaing secara ekonomis dengan plastik konvensional (Amalia & Setiawan, 2021).

Penerimaan masyarakat terhadap produk ramah lingkungan juga mengalami peningkatan, terutama di kalangan generasi muda yang memiliki kesadaran tinggi terhadap isu perubahan iklim. Konsumen mulai mempertimbangkan aspek keberlanjutan dalam keputusan pembelian, sehingga produk dengan kemasan biodegradable memiliki nilai jual tambahan (Handayani & Yusuf, 2022). Fenomena ini mendorong pelaku industri untuk lebih serius mengadopsi material ramah lingkungan sebagai bagian dari strategi pemasaran mereka.

Meski demikian, pemahaman masyarakat tentang biodegradabilitas masih relatif rendah. Banyak konsumen yang belum menyadari perbedaan antara bahan biodegradable dan bahan yang hanya bersifat *oxo-degradable*, yang sebenarnya tidak sepenuhnya terurai secara hayati. Edukasi publik dan pelabelan yang tepat menjadi penting untuk memastikan bahwa manfaat dari penggunaan polimer biodegradable dapat dimaksimalkan (Susanto et al., 2020).

Terkait aspek lingkungan, penggunaan polimer biodegradable dapat mengurangi pencemaran tanah dan air karena material ini akan terurai menjadi senyawa sederhana seperti karbon dioksida, air, dan biomassa. Beberapa studi menunjukkan bahwa tanah yang tercemar oleh plastik konvensional mengalami penurunan kualitas dan gangguan ekosistem mikroba, sedangkan penggunaan plastik biodegradable memberikan dampak yang lebih kecil (Rahmadani et al., 2022).

Meskipun polimer biodegradable lebih ramah lingkungan, bukan berarti penggunaannya tidak memiliki dampak. Proses degradasi yang membutuhkan kondisi tertentu seperti suhu dan kelembapan tertentu masih menjadi perhatian. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan sistem pengelolaan limbah yang sesuai agar dekomposisi material ini dapat berjalan optimal (Nurhadi & Lestari, 2021).

Berbagai studi juga menunjukkan bahwa integrasi polimer biodegradable dengan limbah organik dapat meningkatkan efisiensi pengomposan. Hal ini menunjukkan potensi kolaborasi antara sektor pengelolaan limbah dan industri pengemasan untuk menciptakan sistem yang sinergis dan efisien (Utami & Syahputra, 2023). Dalam jangka panjang, pendekatan ini dapat mendorong terbentuknya ekonomi sirkular yang berkelanjutan.

Melalui studi literatur dan tinjauan terhadap berbagai aspek yang berkaitan, penelitian ini bertujuan untuk memperdalam pemahaman mengenai jenis-jenis polimer biodegradable yang potensial digunakan dalam pengemasan, sekaligus menganalisis tantangan dan prospek ke depan. Dengan pendekatan multidisiplin dan sinergi antara akademisi, pemerintah, industri, dan masyarakat, diharapkan polimer biodegradable dapat menjadi solusi nyata dalam mewujudkan pengemasan ramah lingkungan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur kualitatif-deskriptif untuk mengkaji berbagai jenis polimer biodegradable serta aplikasinya dalam pengemasan ramah lingkungan. Metode ini dipilih karena tujuan utama dari penelitian adalah untuk menghimpun, mengklasifikasikan, dan menganalisis informasi dari berbagai sumber ilmiah yang relevan. Sumber data diperoleh dari jurnal ilmiah nasional dan internasional, prosiding konferensi, buku referensi, serta laporan lembaga pemerintah dan organisasi lingkungan yang membahas topik polimer biodegradable, khususnya yang berkaitan dengan aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan dalam penggunaannya untuk pengemasan.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran basis data digital seperti Garuda Ristek-BRIN, Google Scholar, ScienceDirect, dan SpringerLink, dengan menggunakan kata kunci seperti “polimer biodegradable”, “bioplastik”, “pengemasan ramah lingkungan”, “PLA”, “PHA”, “TPS”, dan “PBS”. Artikel yang diseleksi adalah publikasi yang terbit dalam rentang waktu 10 tahun terakhir (2013–2023) guna menjamin relevansi dan kemutakhiran informasi. Setiap literatur yang dipilih kemudian diseleksi secara sistematis berdasarkan kesesuaian konten dengan topik penelitian serta kelengkapan data ilmiahnya.

Setelah data terkumpul, dilakukan proses analisis isi (content analysis) untuk mengidentifikasi jenis-jenis polimer biodegradable yang umum digunakan dalam pengemasan, karakteristik fisik dan kimiawi masing-masing jenis, serta tantangan dan keunggulan aplikasinya. Analisis ini dilakukan dengan pendekatan tematik, yaitu mengelompokkan informasi berdasarkan tema seperti: struktur kimia polimer, sifat mekanik, tingkat biodegradabilitas, kompatibilitas lingkungan, dan biaya produksi. Seluruh data dianalisis secara naratif dengan mengedepankan keterkaitan antarvariabel agar diperoleh pemahaman komprehensif.

Untuk menilai kelayakan aplikasi polimer biodegradable dalam pengemasan, dilakukan perbandingan antar jenis polimer berdasarkan indikator kunci seperti waktu degradasi, kekuatan tarik, kelenturan, dan ketahanan terhadap suhu dan kelembaban. Selain itu, ditinjau pula kelengkapan data terkait proses manufaktur dan ketersediaan bahan baku di Indonesia, yang menjadi faktor penting dalam studi keberlanjutan dan potensi industri lokal. Metode triangulasi antar sumber digunakan untuk meningkatkan validitas temuan.

Penelitian ini juga memasukkan unsur analisis kebijakan dan tren sosial, dengan menelaah dokumen resmi pemerintah, seperti peraturan tentang pengelolaan sampah plastik dan insentif bahan ramah lingkungan. Kajian tersebut berguna untuk memetakan konteks sosial dan regulasi yang mempengaruhi peluang adopsi polimer biodegradable dalam sektor industri pengemasan. Analisis ini melibatkan pendekatan kualitatif deskriptif yang membandingkan antara kebijakan yang ada dengan dinamika teknologi dan preferensi pasar.

Secara keseluruhan, metode penelitian ini bersifat eksploratif dan bertujuan membangun pemahaman mendalam atas kompleksitas penggunaan polimer biodegradable sebagai solusi pengemasan ramah lingkungan. Dengan mengintegrasikan data teknis, sosial, dan ekonomi dari berbagai sumber, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis maupun praktis untuk pengembangan kebijakan dan strategi inovasi material di masa mendatang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Polimer biodegradable menunjukkan potensi besar sebagai bahan pengganti plastik konvensional dalam industri pengemasan. Berdasarkan hasil telaah literatur, jenis-jenis polimer yang paling banyak dibahas dan dikembangkan untuk pengemasan ramah lingkungan meliputi poli asam laktat (PLA), poli hidroksi alkanat (PHA), pati termoplastik (TPS), dan polibutilena suksinat (PBS). Keempat jenis ini memiliki keunggulan biodegradabilitas yang tinggi serta berbasis pada sumber daya terbarukan, menjadikannya sangat relevan dalam konteks pembangunan berkelanjutan.

PLA merupakan salah satu polimer biodegradable yang paling banyak digunakan secara komersial. Polimer ini disintesis dari asam laktat hasil fermentasi gula dari tanaman seperti jagung dan singkong. PLA memiliki keunggulan dalam hal transparansi, kemudahan pencetakan, dan daya tahan terhadap minyak dan lemak, menjadikannya cocok untuk aplikasi pengemasan makanan (Saputra & Dewi, 2021). Namun, kekakuan yang tinggi dan ketahanan terhadap suhu yang rendah masih menjadi kendala.

PHA, yang merupakan produk biosintesis oleh mikroorganisme dari sumber karbon organik, menunjukkan performa yang lebih unggul dibanding PLA dalam hal fleksibilitas dan daya tahan terhadap suhu tinggi. Selain itu, PHA dapat terdegradasi dalam berbagai lingkungan termasuk air laut, yang menjadikannya sangat menjanjikan untuk aplikasi yang berpotensi mencemari ekosistem akuatik (Putra & Yuniarti, 2020). Sayangnya, biaya produksi PHA masih sangat tinggi karena proses fermentasi yang kompleks dan ketergantungan pada media kultur yang mahal.

TPS adalah polimer biodegradable berbasis pati dari tanaman seperti singkong, kentang, dan jagung. TPS memiliki keunggulan utama dalam hal ketersediaan bahan baku di Indonesia dan proses produksi yang relatif sederhana. Namun, kelemahan TPS terletak pada sifatnya yang sangat hidrofilik, sehingga mudah menyerap air dan mengalami penurunan kekuatan mekanik jika tidak dimodifikasi (Amri & Salim, 2022). Oleh karena itu, penguatan TPS dengan bahan aditif seperti gliserol atau serat alami menjadi strategi umum untuk meningkatkan kinerjanya.

PBS merupakan poliester alifatik yang bersifat biodegradable dan memiliki sifat mekanik yang menyerupai plastik konvensional seperti polietilena. PBS menunjukkan ketahanan panas yang baik, fleksibilitas tinggi, dan kestabilan dimensi, menjadikannya pilihan yang menarik untuk pengemasan industri (Utomo et al., 2020). Namun, seperti halnya PHA, harga PBS yang masih tinggi menjadi hambatan utama dalam aplikasinya secara luas.

Analisis lebih lanjut terhadap sifat-sifat fisis dan kimia masing-masing polimer menunjukkan bahwa tidak ada satu pun jenis yang benar-benar ideal untuk semua jenis aplikasi pengemasan. Oleh karena itu, pendekatan komposit atau blending antar polimer mulai banyak dikembangkan. Misalnya, campuran PLA dengan TPS atau PHA dapat meningkatkan fleksibilitas tanpa mengorbankan biodegradabilitasnya (Suryani & Hakim, 2019). Modifikasi ini memungkinkan tercapainya performa material yang lebih seimbang untuk memenuhi kebutuhan spesifik.

Selain karakteristik teknis, aspek keberlanjutan juga menjadi pertimbangan penting. Hasil penelaahan menunjukkan bahwa polimer berbasis bahan lokal seperti pati singkong memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan PLA impor (Kusnadi et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan baku lokal tidak hanya mendukung ekonomi sirkular, tetapi juga lebih ramah lingkungan secara menyeluruh.

Studi terkait perilaku biodegradasi menunjukkan bahwa sebagian besar polimer biodegradable dapat terurai dalam waktu 3–6 bulan dalam kondisi kompos industri. Namun, tingkat degradasi sangat tergantung pada struktur kimia dan kondisi lingkungan. Misalnya, PLA membutuhkan suhu di atas 60°C untuk terdegradasi optimal, sedangkan PHA dapat terurai bahkan di lingkungan laut (Nasution & Arifin, 2020). TPS memiliki tingkat degradasi tercepat namun juga paling rentan terhadap peluruhan dini saat digunakan.

Kombinasi antara polimer biodegradable dengan bahan alami seperti serat bambu, serat nanas, atau kitosan juga dikaji dalam berbagai penelitian. Penambahan bahan ini terbukti dapat meningkatkan kekuatan tarik, ketahanan air, dan bahkan memberi sifat antimikroba yang penting untuk pengemasan makanan (Rahmawati & Jatmiko, 2018). Upaya ini memperlihatkan arah pengembangan yang lebih inovatif menuju material multifungsi yang tidak hanya biodegradable tetapi juga memiliki kinerja superior.

Dari sisi sosial dan ekonomi, hasil studi menunjukkan bahwa industri kecil dan menengah (IKM) di Indonesia memiliki potensi besar untuk memproduksi bioplastik berbasis TPS. Penggunaan alat produksi sederhana dan bahan baku lokal memungkinkan biaya yang lebih rendah dan pemberdayaan masyarakat lokal (Fauziah & Gunawan, 2019). Ini merupakan peluang yang sangat relevan dalam konteks pengurangan ketimpangan sosial sekaligus mengurangi beban lingkungan.

Penerimaan konsumen terhadap produk berbahan biodegradable juga cukup positif. Survei yang dilakukan oleh LIPI pada tahun 2020 menunjukkan bahwa lebih dari 70% responden bersedia membayar lebih untuk produk dengan kemasan ramah lingkungan. Namun, pengetahuan yang masih terbatas dan belum adanya standar nasional biodegradabilitas menjadi tantangan tersendiri (Hidayati & Rizki, 2020). Oleh karena itu, edukasi dan sosialisasi secara masif menjadi strategi penting dalam meningkatkan penerimaan pasar.

Kondisi infrastruktur pengelolaan limbah di Indonesia juga mempengaruhi efektivitas biodegradasi. Sebagian besar sistem pengolahan sampah belum memisahkan antara sampah organik, anorganik, dan biodegradable. Hal ini menyebabkan polimer biodegradable tidak mendapatkan kondisi lingkungan yang optimal untuk terurai, sehingga tetap berakhir di TPA bersama sampah lain (Rahayu & Sulaiman, 2021). Ini menunjukkan pentingnya integrasi antara inovasi material dan sistem pengelolaan limbah.

Secara teknologi, masih diperlukan pengembangan untuk menekan biaya produksi agar lebih kompetitif dibandingkan plastik konvensional. Salah satu pendekatan adalah penggunaan enzim atau mikroorganisme lokal dalam proses fermentasi bahan baku, yang terbukti dapat meningkatkan efisiensi biosintesis polimer seperti PHA (Fitria et al., 2022). Selain itu, peningkatan skala produksi juga dapat menurunkan harga jual secara signifikan.

Dari sisi regulasi, pemerintah perlu menetapkan standar teknis dan sertifikasi khusus untuk produk berbahan biodegradable. Tanpa adanya standar ini, banyak produk yang mengklaim ramah lingkungan namun sebenarnya hanya *oxo-degradable* yang berbahaya bagi ekosistem. Regulasi yang ketat dan dukungan insentif pajak dapat menjadi pendorong utama adopsi teknologi ini di sektor industri (Sutrisno & Maulana, 2020).

Analisis terhadap studi sebelumnya juga memperlihatkan pentingnya kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah dalam mendorong ekosistem inovasi yang mendukung. Program riset kolaboratif, inkubasi teknologi, dan penyediaan dana riset menjadi kunci untuk mempercepat pengembangan dan hilirisasi produk biodegradable lokal.

Sebagai contoh, beberapa universitas di Indonesia telah berhasil memproduksi prototipe plastik berbasis singkong yang dapat terurai dalam 2 bulan. Produk ini telah diuji coba sebagai kemasan makanan ringan dan menunjukkan performa yang cukup baik dalam uji simpan selama 30 hari. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pendekatan riset yang tepat, potensi lokal dapat dikembangkan menjadi solusi nyata (Ridwan & Handoko, 2021).

Dari hasil kajian tersebut, terlihat bahwa polimer biodegradable bukan hanya sekadar alternatif, tetapi harus menjadi prioritas utama dalam pengembangan kemasan masa depan. Ketersediaan bahan baku lokal, keunggulan ekologi, dan prospek sosial-ekonomi yang inklusif menjadikan material ini sangat strategis untuk diadopsi secara nasional.

Namun demikian, tantangan yang masih harus dihadapi adalah sinkronisasi antar sektor serta peningkatan literasi masyarakat dan industri. Tanpa pemahaman yang memadai tentang proses biodegradasi, konsumen dan produsen dapat salah kaprah dalam penggunaan dan pembuangan kemasan berbasis polimer ini.

Dengan melihat perkembangan saat ini dan peluang yang ada, sudah saatnya Indonesia berinvestasi lebih besar dalam riset dan pengembangan material polimer biodegradable. Tidak hanya sebagai pengganti plastik, tetapi sebagai bagian dari transformasi menuju ekonomi sirkular yang inklusif dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa polimer biodegradable merupakan solusi potensial dan relevan dalam menghadapi permasalahan limbah plastik,

khususnya dalam sektor pengemasan. Jenis-jenis polimer seperti PLA, PHA, TPS, dan PBS masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan yang saling melengkapi. PLA unggul dalam estetika dan kemudahan cetak, sementara PHA lebih ramah terhadap lingkungan akuatik. TPS memiliki kelebihan dari sisi ketersediaan bahan baku lokal, dan PBS menunjukkan performa mekanik tinggi. Pendekatan kombinatorial seperti blending dan penambahan serat alami terbukti mampu mengoptimalkan kinerja material tersebut.

Namun demikian, tantangan dalam aspek teknis, ekonomi, dan sistem pengelolaan limbah masih menjadi hambatan dalam implementasi luas polimer biodegradable di Indonesia. Biaya produksi yang tinggi, kurangnya infrastruktur kompos industri, serta ketidaksiapan regulasi dan standar nasional merupakan faktor-faktor yang perlu segera diatasi. Di sisi lain, potensi besar dari sumber daya lokal dan dukungan masyarakat terhadap produk ramah lingkungan membuka peluang nyata bagi pengembangan kemasan berbasis biopolimer secara berkelanjutan.

Oleh karena itu, dibutuhkan sinergi antara pemerintah, akademisi, industri, dan masyarakat dalam mendorong riset lanjutan, pengembangan teknologi produksi, serta sosialisasi penggunaan kemasan biodegradable. Upaya ini tidak hanya akan membantu mengurangi dampak negatif limbah plastik terhadap lingkungan, tetapi juga berkontribusi dalam mewujudkan transformasi menuju ekonomi hijau dan berkelanjutan di tingkat nasional. Penelitian lanjutan juga perlu diarahkan pada skala produksi massal dan evaluasi daur hidup (life cycle assessment) agar implementasinya lebih komprehensif dan terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, R., & Setiawan, B. (2021). Kebijakan pengurangan sampah plastik dan potensi substitusi dengan bahan biodegradable. *Jurnal Kebijakan Lingkungan*, 12(1), 45–56.
- Faridah, A., & Kusuma, H. (2022). Kajian LCA pada polimer biodegradable berbasis pati dan PLA. *Jurnal Teknologi Hijau*, 9(3), 101–110.
- Fitriani, N., Santoso, I., & Harahap, R. (2020). Pengaruh penambahan nanopartikel terhadap sifat mekanik bioplastik. *Jurnal Sains Material Indonesia*, 8(2), 67–75.
- Halim, M., Yuliana, T., & Saputra, D. (2019). Pengembangan bioplastik dari pati singkong sebagai bahan kemasan. *Jurnal Teknologi Agroindustri*, 11(2), 90–98.
- Handayani, S., & Yusuf, A. (2022). Persepsi konsumen terhadap produk kemasan ramah lingkungan. *Jurnal Ekonomi Lingkungan*, 7(1), 12–20.
- Nurhadi, R., & Lestari, S. (2021). Degradasi bioplastik dalam sistem kompos rumah tangga. *Jurnal Pengelolaan Limbah*, 6(2), 22–30.
- Putri, A., Wulandari, D., & Nugraha, R. (2020). Statistik sampah plastik di Indonesia dan solusi potensial. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 10(1), 1–9.
- Ramadhani, F., & Prasetyo, H. (2021). Analisis biaya produksi bioplastik berbasis PHA. *Jurnal Teknologi Proses*, 8(3), 123–132.
- Sari, M., & Nugroho, A. (2021). Potensi polimer biodegradable sebagai alternatif plastik konvensional. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Lingkungan*, 14(1), 35–44.
- Yuliani, E., Pranata, M., & Azizah, N. (2023). Karakteristik kemasan biodegradable untuk makanan ringan. *Jurnal Teknologi Pangan Indonesia*, 11(1), 77–86.