

## KEMAJUAN TERKINI DALAM PENGEMASAN *BIODEGRADABLE*: PENGUNAAN KEMASAN BERBASIS *POLY(LACTIC-ACID)*– TINJAUAN SISTEMATIS

Marcell Dion Wibowo<sup>1</sup>, Putu Prathiwi Kemala Putri Sosiawan<sup>2</sup>, Muhammad Fikri Hanif<sup>3</sup>,  
Farida Yuliaty<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Program Studi Magister Manajemen, Direktorat Pasca Sarjana, Universitas Sangga Buana

<sup>1</sup>korespondensi: marcell.dion@gmail.com

### ABSTRACT

*The increase in world population has triggered a surge in global plastic production, from 1.5 million tons in 1950 to 370 million tons in 2020, with a projected quadrupling by 2050. The linear economy-based industrial system that relies on fossil raw materials has proven unsustainable due to the depletion of natural resources and its negative impact on the environment. To address this challenge, biodegradable plastics such as Poly(Lactic-Acid) (PLA) are becoming an attractive alternative in eco-friendly packaging. PLA has high biodegradability, low gas emissions, minimal toxicity, as well as compatibility with conventional plastic processing equipment, making it a sustainable solution for food packaging. This research aims to explore PLA as a biodegradable packaging material with a focus on sustainable material development, including the combination of PLA with other biopolymers such as chitin to create antibacterial packaging films using electrospinning techniques. A systematic review approach was conducted by analyzing relevant recent scientific articles (2018-2023). The results of this study are expected to provide insight into the potential of PLA as an innovative solution to reduce the negative impact of conventional plastics on the environment and biodiversity.*

*Keywords: Poly(Lactic-Acid) (PLA), Biodegradable Plastic, Eco-Friendly Packaging, Antibacterial Film, Electrospinning Technique*

### ABSTRAK

*Peningkatan populasi dunia telah memicu lonjakan produksi plastik global, dari 1,5 juta ton pada tahun 1950 menjadi 370 juta ton pada tahun 2020, dengan proyeksi empat kali lipat pada tahun 2050. Sistem industri berbasis ekonomi linier yang mengandalkan bahan baku fosil telah terbukti tidak berkelanjutan akibat berkurangnya sumber daya alam dan dampak negatifnya terhadap lingkungan. Untuk mengatasi tantangan ini, plastik biodegradable seperti Poly(Lactic-Acid) (PLA) menjadi alternatif menarik dalam pengemasan ramah lingkungan. PLA memiliki biodegradabilitas tinggi, emisi gas rendah, toksisitas minimal, serta kompatibilitas dengan peralatan pengolahan plastik konvensional, menjadikannya solusi berkelanjutan untuk kemasan pangan. Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi PLA sebagai bahan kemasan biodegradable dengan fokus pada pengembangan material yang berkelanjutan, termasuk kombinasi PLA dengan biopolimer lain seperti kitin untuk menciptakan film kemasan antibakteri menggunakan teknik elektrospinning. Pendekatan tinjauan sistematis dilakukan dengan menganalisis artikel ilmiah terkini (2018–2023) yang relevan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang potensi PLA sebagai solusi inovatif untuk mengurangi dampak negatif plastik konvensional terhadap lingkungan dan keanekaragaman hayati.*

*Kata Kunci: Poly(Lactic-Acid) (PLA), Plastik Biodegradable, Kemasan Ramah Lingkungan, Film Antibakteri, Teknik Elektrospinning*

### PENDAHULUAN

Peningkatan populasi dunia menyebabkan pertumbuhan eksponensial dalam produksi plastik global dalam beberapa tahun terakhir sehingga memberikan dampak merugikan terhadap alam dan keanekaragaman hayati.

Pada tahun 2020, diproduksi 370 juta ton barang plastik, meningkat dari total 1,5 juta ton pada tahun 1950, dan prediksi menunjukkan bahwa pada tahun 2050, angka ini akan meningkat empat kali lipat (1). Selain itu, selama 150 tahun terakhir, sistem industri

telah didasarkan pada model ekonomi linier yang melibatkan produksi barang manufaktur dari bahan baku berbasis fosil, komersialisasinya, pemanfaatannya, dan akhirnya pembuangannya sebagai sampah melalui pembakaran atau pembuangan ke tempat pembuangan akhir (TPA). Akibat berkurangnya sumber daya alam dan dampak negatif terhadap lingkungan yang muncul, model ini dianggap tidak lagi berkelanjutan untuk masa depan (2).

Sebagai solusi atas masalah ini, permintaan terhadap kemasan yang ramah lingkungan semakin meningkat, dan salah satu bahan yang semakin banyak dipertimbangkan adalah plastik biodegradable, seperti *Poly(Lactic-Acid)* (PLA). PLA memiliki sejumlah keunggulan, termasuk sifat biodegradabilitas yang memungkinkan kemasan terurai dengan mudah di lingkungan, emisi gas yang rendah, serta toksisitas yang minimal, menjadikannya bahan yang ideal untuk pengemasan pangan yang lebih berkelanjutan (3). Selain itu, PLA juga dapat diproses menggunakan peralatan pengolahan plastik konvensional, yang membuatnya lebih mudah diterapkan di industri. Salah satu penerapan PLA yang menarik adalah dalam kombinasi dengan biopolimer lain, seperti kitin (chitosan), untuk menghasilkan film kemasan dengan sifat antibakteri. Teknik elektrospinning digunakan untuk memproduksi nanofiber PLA yang dapat diaplikasikan pada permukaan film kemasan, memberikan lapisan antibakteri yang efektif tanpa mengurangi sifat fisik atau penghalang film (4). Berdasarkan hal tersebut,

tujuan penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi *Poly(lactic-Acid)* sebagai alternatif solusi kemasan ramah lingkungan yang dapat menggantikan plastik konvensional, dengan fokus pada pengembangan bahan kemasan biodegradable yang berkelanjutan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan keanekaragaman hayati.

## **METODE**

Penelitian ini merupakan tinjauan sistematis dengan kriteria inklusi dalam penelitian ini mencakup artikel yang diterbitkan dalam 5 tahun terakhir (2018-2023) dan membahas penggunaan PLA dalam kemasan biodegradable, baik dalam penelitian dasar, aplikasi industri, atau evaluasi teknis. Artikel berasal dari jurnal ilmiah peer-reviewed, laporan konferensi, atau dokumen teknis yang dapat diakses secara penuh dalam bahasa Inggris atau Indonesia. Kriteria eksklusi mencakup artikel yang tidak relevan dengan topik PLA atau pengemasan *biodegradable*, yang tidak dapat diakses penuh, atau yang tidak menyertakan data atau analisis terkait penggunaan PLA dalam pengemasan.

Strategi pencarian literasi akan dilakukan melalui database ilmiah utama seperti Scopus, Web of Science, Google Scholar, SpringerLink, dan ScienceDirect dengan menggunakan kata kunci seperti "*Poly(Lactic Acid)*", "*PLA packaging*", "*biodegradable packaging*", dan "*sustainable packaging*". Artikel yang terdeteksi akan diperiksa berdasarkan abstrak dan judulnya, kemudian artikel yang memenuhi kriteria inklusi akan

dibaca secara penuh untuk memastikan relevansi dan kelayakan.

Penelitian ini menggunakan metode PROSPERO dan PRISMA untuk melakukan tinjauan sistematis terhadap kemajuan terkini dalam pengemasan biodegradable berbasis Poly(lactic acid) (PLA). Protokol penelitian didaftarkan di PROSPERO untuk memastikan transparansi dan menghindari duplikasi penelitian. Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci terkait PLA dan pengemasan ramah lingkungan melalui berbagai database seperti Scopus, PubMed, dan ScienceDirect. Artikel yang ditemukan kemudian disaring berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan, seperti membahas sifat mekanik, termal, dan biodegradabilitas PLA dalam konteks kemasan. Proses ini menghasilkan artikel yang relevan untuk analisis lebih lanjut, dan hasilnya disajikan dengan mengikuti pedoman PRISMA, yang memastikan seleksi artikel yang objektif dan transparan. Dengan pendekatan ini, penelitian ini memberikan tinjauan komprehensif mengenai perkembangan penggunaan PLA dalam industri kemasan biodegradable yang berkelanjutan.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### ***Poly(lactic-Acid) (PLA)***

Poly(Lactic Acid) (PLA) adalah polimer biodegradable yang berasal dari sumber daya terbarukan seperti pati, jagung, tapioka, dan serbuk pati. PLA merupakan salah satu poliester berbasis biologis yang banyak

dipelajari karena kemampuannya untuk terurai secara hayati, sehingga sangat cocok digunakan dalam kemasan makanan. Polimer ini tergolong biodegradable, yang artinya dapat terurai dan mengalami kerusakan saat bersentuhan dengan kelembapan atau lingkungan tertentu. Degradasi PLA terjadi melalui berbagai mekanisme, termasuk proses hidrolitik, oksidatif, termal, mikroba, enzimatis, kimia, dan fotodegradatif. Hidrolisis menjadi mekanisme utama dalam proses degradasi PLA karena dapat memutuskan ikatan ester, menghasilkan oligomer dan monomer asam. Proses degradasi ini diawali oleh hidrolisis struktur PLA menjadi senyawa larut air yang kemudian diikuti oleh serangan bakteri pada residu terfragmentasi, menghasilkan uap air, karbon dioksida, dan senyawa organik lainnya. Degradasi hidrolitik ini dapat terjadi selama proses peleburan, terutama ketika terdapat uap air pada suhu tinggi, dengan kondisi basa yang mempercepat reaksi (5).

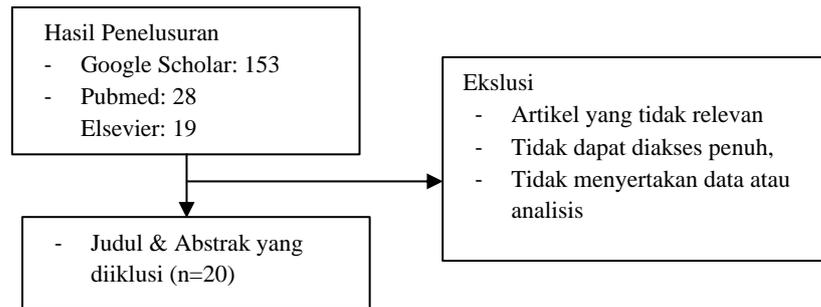
PLA memiliki berbagai sifat unggul yang mendukung penggunaannya dalam aplikasi kemasan. Sifat transparansinya yang tinggi menjadi daya tarik utama untuk pengemasan makanan. PLA juga memiliki permeabilitas terhadap karbon dioksida yang lebih baik dibandingkan oksigen, serta penghalang oksigen yang 20 kali lebih baik daripada polistirena (PS), yang menjadikannya pilihan ideal untuk kemasan makanan yang membutuhkan penghalang tinggi terhadap oksigen. Ketahanan PLA terhadap air, lemak, dan minyak cukup baik, sementara

kemampuan pemrosesan termalnya lebih unggul dibandingkan bioplastik lainnya, dengan suhu transisi gelas yang tinggi dan suhu leleh yang rendah. Selain itu, PLA menunjukkan sifat penghalang cahaya ultraviolet yang lebih baik dibandingkan polietilena berdensitas rendah (LDPE). Sifat daur ulang PLA juga menjadi nilai tambah, karena dapat dihidrolisis menjadi asam laktat dengan menggunakan uap atau air mendidih, memungkinkan daur ulang molekuler untuk mendukung keberlanjutan bahan kemasan (6).

Dibandingkan plastik konvensional, PLA memiliki sejumlah keunggulan, termasuk biodegradabilitas yang memungkinkan proses dekomposisi alami oleh panas, kelembapan, atau enzim mikroba. Polimer ini juga menawarkan solusi berkelanjutan melalui pemanfaatan bahan baku alami yang dapat terurai secara hayati, dengan biaya produksi rendah, aksesibilitas tinggi, dan fleksibilitas dalam proses manufaktur. PLA terbukti dapat terdegradasi dengan baik di lingkungan tanah dan lebih efisien dalam lingkungan kompos, meskipun proses degradasinya lebih lambat dibandingkan material lain. Selain itu, PLA memiliki sifat mekanik yang baik dan biokompatibilitas, memungkinkan material ini untuk dibentuk menjadi berbagai bentuk,

sehingga kinerjanya sebanding dengan plastik berbasis minyak bumi (6).

Aplikasi PLA dalam pengemasan biodegradable mencakup berbagai produk seperti cangkir, paket blister, wadah makanan dan minuman, kotak makan siang, hingga kemasan makanan segar. PLA juga digunakan untuk kemasan air minum, jus, dan yogurt.<sup>5</sup> Kemampuan PLA untuk mempertahankan bentuk pada suhu rendah menjadikannya pilihan yang tepat untuk kemasan makanan beku dan baki termal. Dalam bidang medis, PLA banyak digunakan untuk perancah rekayasa jaringan, bahan sistem pengiriman obat, membran penutup, dan jahitan, berkat sifat bioresorbabilitas dan biokompatibilitasnya (6,7). Bahkan dalam perangkat fiksasi tulang, PLA menjadi alternatif bahan logam karena kekuatannya yang tinggi dan sifat terurai yang dimilikinya. Selain itu, PLA juga diminati di industri pertanian, medis, dan farmasi, terutama untuk kemasan produk berumur pendek yang tidak memerlukan penghalang tinggi terhadap gas dan uap air. Dengan potensi aplikasi yang luas, PLA menjadi solusi yang menjanjikan untuk mendukung keberlanjutan dan pengurangan limbah plastik konvensional.



Gambar 1: Paradigma Penelitian

### Kemajuan Terkini dalam Pengemasan Berbasis Poly Lactic-Acid (PLA)

Inovasi dalam proses produksi polylactic acid (PLA) terus berkembang, terutama dalam peningkatan efisiensi teknologi fermentasi dan pemrosesan. Penggunaan strain mikroba yang dimodifikasi secara genetik telah meningkatkan hasil asam laktat dari bahan baku nabati, mempersingkat waktu fermentasi, dan mengurangi biaya serta dampak lingkungan produksi. Selain itu, teknologi baru memungkinkan pemanfaatan limbah pertanian dan biomassa non-pangan sebagai bahan baku, didukung oleh inovasi dalam katalis dan proses polimerisasi yang lebih efisien, sehingga PLA menjadi lebih kompetitif dibandingkan plastik konvensional (8,9).

Upaya lain berfokus pada peningkatan sifat fisik dan kimia PLA, seperti daya tahan terhadap kelembaban, suhu, dan oksidasi. Teknologi pelapisan biodegradable dan campuran polimer, misalnya dengan kitosan, telah memperbaiki ketahanan PLA, membuatnya lebih cocok untuk kemasan makanan dan minuman. Modifikasi melalui penggabungan serat alami seperti selulosa, serta penggunaan plastikizer dan kopolimer,

juga meningkatkan kekuatan mekanik dan fleksibilitas PLA, memperluas aplikasinya pada pengemasan fleksibel dan produk sekali pakai (8).

Aplikasi PLA kini meluas ke berbagai industri. Dalam industri makanan dan minuman, PLA digunakan untuk wadah, kantong, dan pembungkus, termasuk untuk produk beku. PLA juga digunakan di industri kosmetik untuk botol dan wadah, di dunia elektronik sebagai kemasan pelindung, serta di industri fashion dalam pembuatan tekstil ramah lingkungan (9). Pengembangan lebih lanjut mencakup campuran PLA dengan bahan alami seperti karet alam dan serat tanaman untuk meningkatkan sifat mekanik tanpa mengurangi kemampuan biodegradasinya. Penambahan agen pengawet dan penguat juga memungkinkan aplikasi khusus, seperti pengemasan makanan dan farmasi untuk memperpanjang umur simpan produk (8,9)

Polylactic Acid (PLA) semakin banyak diteliti sebagai alternatif ramah lingkungan untuk material kemasan konvensional. Beberapa penelitian telah mengeksplorasi berbagai aspek dari PLA,

mulai dari produksi, sifat mekanik, hingga pengembangan nanokomposit untuk meningkatkan performanya (8).

Penelitian lain menunjukkan bahwa meskipun PLA memiliki banyak keunggulan, masih ada tantangan yang harus diatasi agar lebih kompetitif dibandingkan plastik berbasis minyak bumi (8). Sejalan dengan itu, Niaounakis menyoroti tren penggunaan biopolimer, termasuk PLA, dalam industri kemasan. Studi ini menegaskan bahwa PLA merupakan material yang menjanjikan, tetapi masih memerlukan inovasi lebih lanjut dalam pengolahan dan formulasi (9).

Andrady dan Neal membahas dampak lingkungan dari plastik konvensional dan menyoroti keunggulan PLA sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan. Meskipun PLA lebih ramah lingkungan, penelitian ini juga menggarisbawahi perlunya perbaikan dalam karakteristik fisik PLA agar dapat menggantikan plastik tradisional secara lebih luas (10). Dalam penelitian lain, Auras et al. secara khusus membandingkan performa PLA dengan

material kemasan lainnya. Hasilnya menunjukkan bahwa PLA memiliki potensi besar dalam industri kemasan, tetapi perlu dilakukan modifikasi tertentu agar lebih sesuai untuk aplikasi spesifik (11).

Lebih lanjut, Avérous dan Pollet mengeksplorasi penggunaan nanofiller silikat dalam PLA untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan sebagai penghalang. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa kombinasi PLA dengan material silikat secara signifikan meningkatkan kualitasnya sebagai bahan kemasan yang lebih kuat dan tahan lama (12).

Secara keseluruhan, berbagai penelitian menegaskan bahwa PLA adalah material kemasan yang menjanjikan dengan sifat biodegradable dan biokompatibel. Namun, untuk meningkatkan daya saingnya di pasar, perlu dilakukan inovasi dalam formulasi dan pengolahan PLA, termasuk melalui teknik penguatan dengan nanokomposit dan peningkatan sifat mekanik serta termal.

**Tabel 1: Penelitian mengenai PLA dalam pengemasan**

Nama dan Tahun	Judul	Metode	Hasil	Kesimpulan
M. Jamshidia et al., 2010 (8)	"Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposit	Kajian metode produksi PLA, aplikasi dalam kemasan, dan pengembangan	Identifikasi keunggulan PLA seperti biodegradabilitas dan sifat mekanik, serta tantangan	PLA memiliki potensi besar untuk aplikasi kemasan makanan, terutama jika sifatnya

Nama dan Tahun	Judul	Metode	Hasil	Kesimpulan
	es, and Release Studies"	nanokomposit PLA.	stabilitas termal dan keterbatasan sebagai penghalang gas.	ditingkatkan dengan nanokomposit.
M. Niaounakis, 2015 (9)	"Biopolymers: Applications and Trends"	Tinjauan komprehensif tentang biopolimer, dengan fokus pada peran PLA dalam aplikasi kemasan.	Analisis sifat PLA, teknik pengolahan, dan tren pasar dalam industri kemasan.	PLA adalah alternatif yang layak untuk plastik konvensional, dengan penelitian yang terus dilakukan untuk mengatasi keterbatasannya.
A. L. Andrady dan M. A. Neal, 2009 (10)	"Applications and Societal Benefits of Plastics"	Tinjauan tentang berbagai jenis plastik, termasuk PLA, serta aplikasinya dalam masyarakat.	Diskusi tentang dampak lingkungan dari plastik dan manfaat opsi biodegradable seperti PLA.	PLA menawarkan keuntungan lingkungan dalam aplikasi kemasan, tetapi karakteristik kinerjanya perlu terus ditingkatkan.
R. Auras et al., 2004 (11)	"An Overview of Polylactides as Packaging Materials"	Analisis mendetail tentang sifat PLA yang relevan untuk kemasan, termasuk sifat mekanik dan penghalang gas.	Evaluasi kinerja PLA dibandingkan dengan bahan kemasan tradisional.	PLA merupakan material kemasan yang menjanjikan, tetapi modifikasi diperlukan agar sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu.
L. Avérous dan E. Pollet, 2012 (12)	"Environmental Silicate Nano-Biocomposites"	Eksplorasi nanokomposit berbasis PLA yang mengandung material silikat untuk aplikasi kemasan.	Penilaian peningkatan sifat seperti kekuatan mekanik dan kinerja penghalang dalam nanokomposit PLA.	Penambahan nanofiller silikat ke dalam matriks PLA secara signifikan meningkatkan kesesuaiannya untuk aplikasi kemasan.

### Keunggulan dan Tantangan Penggunaan Poly Lactic-Acid (PLA) dalam Pengemasan

Poly lactic Acid (PLA) memiliki berbagai keunggulan yang menjadikannya bahan pilihan untuk pengemasan. Salah satu keunggulan utamanya adalah biodegradabilitas dan komposibilitas yang jauh lebih baik dibandingkan plastik konvensional seperti PET atau polietilen. PLA dapat terurai secara alami dalam kondisi

komposting yang tepat, sehingga membantu mengurangi akumulasi plastik di lingkungan yang membutuhkan ratusan tahun untuk terurai (13,14). Selain itu, PLA diproduksi dari sumber daya terbarukan seperti jagung dan tebu, yang mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta jejak karbon yang dihasilkan dibandingkan plastik berbasis petrokimia (15). Fleksibilitas PLA juga menjadi keunggulan lain, karena dapat

digunakan dalam berbagai aplikasi pengemasan seperti makanan, minuman, kosmetik, dan elektronik. Inovasi dalam pemrosesan PLA bahkan membuka peluang penggunaannya di sektor tekstil dan mode, menjadikannya solusi pengemasan yang serbaguna (16).

Penggunaan PLA juga memiliki beberapa tantangan. Salah satunya adalah ketahanan terhadap suhu tinggi dan kelembaban, di mana titik lelehnya yang rendah (sekitar 60°C) membatasi penggunaannya untuk produk dengan kebutuhan suhu tinggi. PLA juga menyerap kelembaban, yang dapat memengaruhi kualitas kemasan dalam kondisi penyimpanan lembap (17). Biaya produksinya yang lebih tinggi dibandingkan plastik tradisional menjadi penghalang utama dalam adopsi luas, terutama untuk produk pengemasan sekali pakai yang mengutamakan efisiensi biaya (18). Selain itu, pengumpulan dan pengolahan limbah PLA pasca-penggunaan masih terbatas karena kurangnya infrastruktur untuk mendaur ulang atau mengkomposkan PLA, yang sering kali berakhir di tempat pembuangan sampah atau dibakar, mengurangi manfaat lingkungannya (19). Tantangan lain adalah daya tahan jangka panjangnya yang kurang, sehingga tidak cocok untuk barang yang memerlukan pengemasan dengan ketahanan lebih tinggi, seperti elektronik dan produk farmasi yang membutuhkan perlindungan dari kelembaban dan oksidasi (20).

## **SIMPULAN**

Polylactic Acid (PLA) merupakan bahan pengemasan ramah lingkungan dengan keunggulan seperti biodegradabilitas tinggi, penggunaan sumber daya terbarukan, dan fleksibilitas dalam berbagai aplikasi. Namun, tantangan seperti ketahanan terbatas, biaya produksi tinggi, dan kurangnya infrastruktur pengelolaan limbah masih menghambat adopsinya secara luas. Pengembangan teknologi dan infrastruktur diperlukan untuk memaksimalkan potensi PLA sebagai alternatif plastik konvensional.

## **DAFTAR PUSTAKA**

1. KARLSSON, Magnus Bo, et al. Climate footprint assessment of plastic waste pyrolysis and impacts on the Danish waste management system. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119780.
2. Alola, Andrew Adewale, and Tomiwa Sunday Adebayo. "Analysing the waste management, industrial and agriculture greenhouse gas emissions of biomass, fossil fuel, and metallic ores utilization in Iceland." *Science of The Total Environment* 887 (2023): 164115.
3. Gzyra-Jagiela, Karolina, et al. "Modification of Poly (lactic acid) by the Plasticization for Application in the Packaging Industry." *Polymers* 13.21 (2021): 3651.
4. WU, Jia-hui, et al. Electrospinning of PLA nanofibers: Recent advances and its potential application for food packaging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70.27: 8207-8221.
5. Malek, N. S. A., et al. "Preparation and characterization of biodegradable polylactic acid (PLA) film for food packaging application: A Review." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1892. No. 1. IOP Publishing, 2021.

6. Ncube, Lindani Koketso, et al. "Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials." *Materials* 13.21 (2020): 4994.
7. Singhvi, M. S., S. S. Zinjarde, and D. V. Gokhale. "Polylactic acid: synthesis and biomedical applications." *Journal of applied microbiology* 127.6 (2019): 1612-1626.
8. Jamshidian M, Tehrany EA, Imran M, Jacquot M, Desobry S. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2010;9(5):552-571.
9. Niaounakis M. Biopolymers: Applications and Trends. *Oxford: William Andrew Publishing*; 2015.
10. Andrady AL, Neal MA. Applications and Societal Benefits of Plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009;364(1526):1977-1984.
11. Auras R, Harte B, Selke S. An Overview of Polylactides as Packaging Materials. *Macromolecular Bioscience*. 2004;4(9):835-864.
12. Avérous L, Pollet E. Environmental Silicate Nano-Biocomposites. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*; 2012.
13. Banjanin, Bojan, et al. "Global market structure." *Polymers for 3D Printing*. William Andrew Publishing, 2022. 353-367.
14. Barca, Adele, et al. "Managing waste packaging for a sustainable future: a strategic and efficiency analysis in the European context." *Environment, Development and Sustainability* (2024): 1-23.
15. González-López, Martín Esteban, et al. "Current trends in biopolymers for food packaging: a review." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 7 (2023): 1225371.
16. Ghasemlou, Mehran, Colin J. Barrow, and Benu Adhikari. "The future of bioplastics in food packaging: An industrial perspective." *Food Packaging and Shelf Life* 43 (2024): 101279.
17. Taib NA, Rahman MR, Huda D, Kuok KK, Hamdan S, Bakri MK, Julaihi MR, Khan A. A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer. *Polymer Bulletin*. 2023 Feb;80(2):1179-213.
18. de Oliveira PZ, de Souza Vandenberghe LP, de Mello AF, Soccol CR. A concise update on major poly-lactic acid bioprocessing barriers. *Bioresource Technology Reports*. 2022 Jun 1;18:101094.
19. de Albuquerque TL, Júnior JE, de Queiroz LP, Ricardo AD, Rocha MV. Polylactic acid production from biotechnological routes: A review. *International journal of biological macromolecules*. 2021 Sep 1;186:933-51.
20. Wu L, Park J, Kamaki Y, Kim B. Optimization of the fused deposition modeling-based fabrication process for polylactic acid microneedles. *Microsystems & Nanoengineering*. 2021 Aug 2;7(1):58.