

Kemajuan Terkini Bioplastik Berbasis Sagu: Metode Preparasi, Karakteristik, Tantangan, dan Perspektif Masa Depan

Recent Advances in Sago-Based Bioplastics: Preparation Methods, Characteristics, Challenges, and Future Perspectives

Rizky Fian Azhari¹, Susilowati¹, Agnes Dyah Novitasari Lestari^{1*)}

¹ Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Papua,
Manokwari, Indonesia

^{*)}Corresponding author: a.dyahnovitasari@gmail.com

ABSTRAK

Article history:

Received: 13 July 2026

Revised: 24 July 2026

Accepted: 27 July 2026

Available online: 27 July 2026

Kata kunci:

Bioplastik
pati sagu
metode preparasi
sifat material biodegradabilitas.

Peningkatan penggunaan plastik berbasis petrokimia telah menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan akibat sifatnya yang sulit terdegradasi. Oleh karena itu, pengembangan bioplastik dari sumber daya terbarukan menjadi salah satu solusi yang menjanjikan, termasuk bioplastik berbasis sagu (*Metroxylon sagu* Rottb.) yang memiliki ketersediaan melimpah dan kandungan pati yang tinggi. Artikel tinjauan ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan terkini dalam preparasi bioplastik berbasis sagu, karakteristik yang dihasilkan, tantangan dalam pengembangannya, serta prospek penerapannya di masa mendatang. Metode yang digunakan berupa kajian literatur terhadap berbagai artikel ilmiah yang relevan mengenai produksi dan pengembangan bioplastik berbasis sagu. Hasil kajian menunjukkan bahwa sifat bioplastik sagu dapat ditingkatkan melalui modifikasi formulasi, penambahan *plasticizer*, penguatan menggunakan *filler*, serta teknik pengolahan yang tepat. Bioplastik berbasis sagu memiliki potensi biodegradabilitas yang baik, namun masih menghadapi beberapa keterbatasan seperti ketahanan terhadap air yang rendah dan sifat mekanik yang perlu ditingkatkan. Dengan perkembangan teknologi modifikasi material dan inovasi formulasi, bioplastik berbasis sagu memiliki peluang besar untuk menjadi alternatif material ramah lingkungan yang berkelanjutan.

ABSTRACT

Keywords:

Bioplastic
sago starch
preparation method
material properties
biodegradability.

The increasing use of petroleum-based plastics has led to various environmental problems due to their non-biodegradable nature. Therefore, the development of bioplastics derived from renewable resources has become a promising alternative, including sago-based bioplastics, which are abundant and have high starch content. This review article aims to examine recent advances in the preparation of sago-based bioplastics, their resulting properties, challenges in their development, and future application prospects. The method used in this study is a literature review of various relevant scientific articles related to the production and development of sago-based bioplastics. The findings indicate that the properties of sago-based bioplastics can be improved through formulation modification, the addition of plasticizers, reinforcement with fillers, and appropriate processing techniques. Sago-based bioplastics exhibit good biodegradability; however, they still face several limitations, such as low water resistance and mechanical properties that require further improvement. With advances in material modification technologies and formulation innovations, sago-based bioplastics have significant potential to become sustainable and environmentally friendly alternative materials.

© 2026 The Author(s). Published by ITY

This is an Open Access article under the [CC-BY-SA](#) license



PENDAHULUAN

Penggunaan plastik berbasis petrokimia terus meningkat karena memiliki keunggulan seperti biaya produksi yang relatif rendah, ringan, fleksibel, serta memiliki sifat mekanik yang baik. Namun, sifat plastik konvensional yang sulit mengalami degradasi menyebabkan akumulasi limbah plastik yang menjadi permasalahan serius bagi lingkungan, termasuk pencemaran tanah dan perairan. Oleh karena itu, pengembangan material alternatif yang berasal dari sumber daya terbarukan dan memiliki kemampuan biodegradasi yang lebih baik semakin mendapat perhatian luas. Bioplastik menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan karena dapat diproduksi dari biomassa alami serta memiliki potensi mengurangi ketergantungan terhadap plastik berbasis fosil (Ubaidah et al., 2024; Shanmugam et al., 2026; Swetha et al., 2024; Tharanathan, 2003; Yadav & Nikalje, 2024).

Salah satu sumber biomassa yang banyak diteliti untuk produksi bioplastik adalah pati dari berbagai tanaman karena ketersediaannya yang melimpah, biaya yang relatif rendah, sifat dapat diperbarui, serta kemampuannya untuk membentuk

film (Dutta & Sit, 2024). Meskipun demikian, bioplastik berbasis pati murni masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama sifat mekanik yang rendah dan sensitivitas yang tinggi terhadap air. Berbagai pendekatan telah diterapkan untuk mengatasi keterbatasan bioplastik berbasis pati, termasuk penambahan *plasticizer*, penggunaan *filler* sebagai bahan penguat, pencampuran dengan polimer lain, serta modifikasi struktur pati. Pendekatan-pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan karakteristik fisik, mekanik, dan termal bioplastik sehingga memperluas potensi aplikasinya sebagai material ramah lingkungan (Akuyenze et al., 2025; Avérous, 2004; Hossain et al., 2024; Jayarathna et al., 2022; Tan et al., 2022).

Sagu (*M. sagu*) merupakan salah satu sumber pati alami yang berpotensi besar sebagai bahan baku bioplastik karena ketersediaannya yang melimpah, terutama di kawasan Asia Tenggara dan wilayah tropis lainnya. Pati sagu memiliki kandungan karbohidrat yang tinggi, kemampuan membentuk film yang baik, serta bersifat *biodegradable*, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai material bioplastik (AL-Fakih et al., 2024; Ansanay et al., 2022; Guleria et al., 2024; Tahnur et al., 2026; Tukenmez Emre et al., 2025).

Berbagai penelitian telah berhasil mengembangkan bioplastik berbasis sagu menggunakan metode *solution casting*, yang meliputi proses gelatinisasi pati, pencampuran dengan *plasticizer*, dan pengeringan hingga membentuk film bioplastik. Gliserol merupakan *plasticizer* yang paling banyak digunakan karena mampu meningkatkan fleksibilitas dan mengurangi kerapuhan film. Selain itu, sorbitol dan polietilen glikol (PEG) juga dimanfaatkan untuk meningkatkan elastisitas serta kemudahan proses pembentukan bioplastik. Penambahan bahan penguat alami, bahan anorganik, maupun *nanofiller* juga telah banyak diterapkan untuk meningkatkan kekuatan mekanik, stabilitas termal, sifat penghalang terhadap uap air, serta morfologi bioplastik berbasis sagu (Nawab et al., 2016; Pawase et al., 2025; Sanyang et al., 2016; Tan et al., 2022; Zamrud et al., 2021).

Meskipun memiliki potensi yang besar, bioplastik berbasis sagu masih menghadapi berbagai tantangan yang membatasi penerapannya secara luas. Sifat hidrofilik pati menyebabkan bioplastik sangat sensitif terhadap kelembaban sehingga dapat menurunkan stabilitas dimensi dan kekuatan mekaniknya. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai strategi telah dikembangkan, antara lain optimasi komposisi *plasticizer*, penambahan *filler*, pembentukan komposit dan campuran polimer, modifikasi kimia pati, serta penerapan teknik pengolahan yang lebih efektif. Pendekatan tersebut bertujuan meningkatkan sifat mekanik, stabilitas termal, ketahanan terhadap kelembapan, dan performa bioplastik sehingga lebih kompetitif dibandingkan plastik konvensional (Fan & Picchioni, 2020; Rajeshkumar et al., 2023; Wang et al., 2023; Wang et al., 2020).

Berdasarkan berbagai perkembangan tersebut, masih diperlukan kajian yang komprehensif mengenai teknik preparasi, karakteristik, tantangan, dan prospek pengembangan bioplastik berbasis sagu. Oleh karena itu, artikel tinjauan ini bertujuan mengulas perkembangan terkini mengenai metode preparasi, karakteristik fisik, mekanik, dan termal, berbagai tantangan, serta perspektif pengembangan

bioplastik berbasis sago sebagai material berkelanjutan di masa depan.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kajian literatur (*literature review*) yang bertujuan untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan menganalisis berbagai hasil penelitian terkait perkembangan bioplastik berbasis sago. Aspek yang dikaji meliputi sumber dan karakteristik pati sago, metode preparasi bioplastik, penggunaan plasticizer dan *filler*, sifat fisik, mekanik, termal, morfologi, biodegradabilitas, serta tantangan dan prospek pengembangan bioplastik berbasis sago.

Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah internasional, yaitu Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan dalam penelusuran literatur dengan menggunakan beberapa kata kunci meliputi "sago-based bioplastics", "sago starch bioplastics", "starch-based bioplastics", "biodegradable films", "biopolymer", "plasticizer", dan "*filler*". Literatur yang dipilih terutama berasal dari artikel jurnal ilmiah yang diterbitkan dalam 10 tahun terakhir untuk memastikan informasi yang diperoleh mencerminkan perkembangan penelitian terkini. Namun, beberapa referensi yang lebih lama tetap digunakan karena berperan sebagai landasan teori dan acuan penting dalam perkembangan awal bioplastik berbasis pati.

Berdasarkan hasil penelusuran literatur, diperoleh sekitar 120 artikel yang relevan dengan topik kajian. Sebanyak 100 artikel yang paling relevan dipilih berdasarkan karakteristik pati sago, metode preparasi bioplastik, penggunaan plasticizer dan *filler*, karakterisasi material, biodegradabilitas, serta tantangan dan prospek pengembangan bioplastik berbasis sago. Artikel-artikel yang dipilih kemudian digunakan sebagai sumber utama dalam penyusunan artikel tinjauan ini.

Kriteria inklusi dalam kajian ini mencakup artikel penelitian dan artikel tinjauan yang relevan dengan topik preparasi bioplastik, modifikasi material, karakterisasi, serta kinerja bioplastik yang dihasilkan. Literatur yang tidak sesuai dengan fokus kajian, memiliki informasi terbatas, atau berasal dari sumber yang tidak kredibel secara akademik dikeluarkan dari analisis.

Literatur yang terpilih kemudian dianalisis secara kualitatif dan dikelompokkan berdasarkan topik pembahasan, meliputi metode preparasi bioplastik berbasis sago, pengaruh penggunaan plasticizer dan *filler*, karakteristik fisik, mekanik, termal, dan morfologi, kemampuan biodegradasi, serta tantangan dan peluang pengembangannya di masa depan. Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam penyusunan pembahasan mengenai perkembangan terkini bioplastik berbasis sago.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik dan Potensi Pati Sagu sebagai Bahan Baku Bioplastik

Pati sagu merupakan salah satu biopolimer alami yang memiliki potensi besar sebagai bahan baku dalam pengembangan bioplastik. Hal ini dikarenakan pati sagu berasal dari sumber daya terbarukan, tersedia secara melimpah di wilayah tropis, serta memiliki kemampuan untuk membentuk film yang baik. Tanaman sagu (*M. sagu*) telah mendapatkan perhatian yang semakin besar dalam pengembangan material berbasis biomassa karena kandungan patinya yang tinggi serta potensinya untuk diaplikasikan dalam berbagai bidang, termasuk bioplastik, biokomposit, dan material ramah lingkungan (Ningrum et al., 2023; Silviana & Dalanta, 2024; Sulaeman et al., 2023).

Secara umum, pati sagu tersusun atas dua komponen utama, yaitu amilosa dan amilopektin. Amilosa merupakan polimer glukosa dengan struktur rantai relatif linear yang berperan penting dalam pembentukan film, proses gelatinisasi, serta karakteristik tekstur material berbasis pati. Sementara itu, amilopektin memiliki struktur bercabang yang berpengaruh terhadap sifat fisik, kristalinitas, dan perilaku pemrosesan pati. Perbandingan antara kandungan amilosa dan amilopektin menjadi salah satu faktor penting yang menentukan sifat akhir bioplastik yang dihasilkan (Ningrum et al., 2023; Zhiguang et al., 2025).

Karakteristik tersebut menjadikan pati sagu sebagai kandidat yang menjanjikan dalam produksi bioplastik (Dhalsamant et al., 2025). Kemampuan pati untuk mengalami gelatinisasi ketika dipanaskan dalam air memungkinkan terbentuknya matriks polimer yang dapat dicetak menjadi film bioplastik (Xie et al., 2025). Selain itu, pati sagu memiliki sifat biodegradable sehingga berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap plastik berbasis petrokimia. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pati sagu telah berhasil digunakan dalam formulasi film bioplastik dengan penambahan berbagai komponen seperti gliserol, sorbitol, kitosan, maupun bahan penguat lainnya untuk meningkatkan fleksibilitas, stabilitas, serta karakteristik fungsional material (Chakraborty et al., 2022; Guleria et al., 2024; Horn, Martins, & Plepis, 2023; Jin et al., 2024).

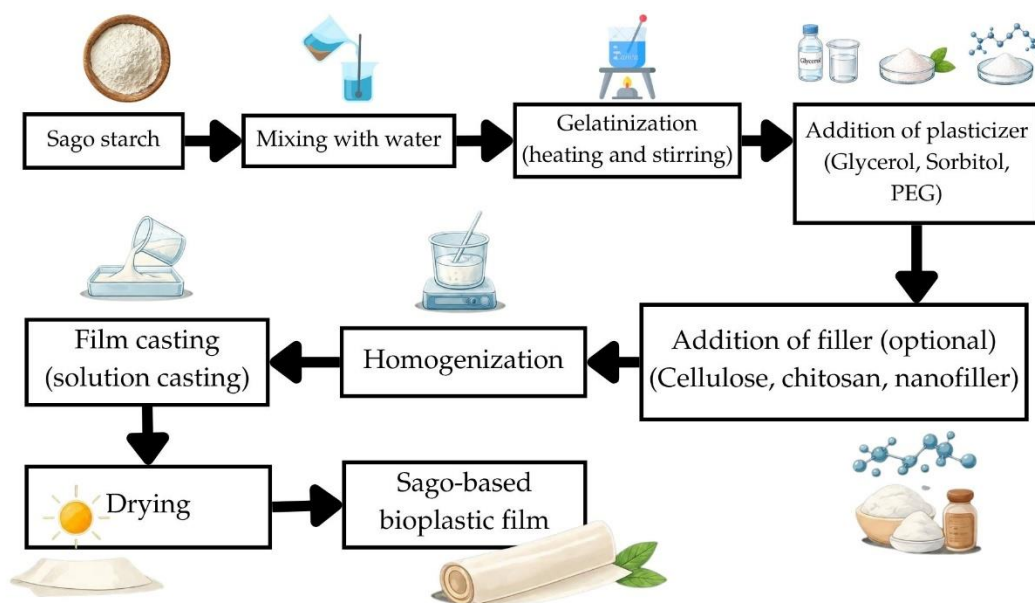
Meskipun memiliki berbagai keunggulan, pati sagu juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Sifat hidrofilik akibat banyaknya gugus hidroksil pada struktur pati menyebabkan bioplastik berbasis sagu memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap kelembapan dan air (Núñez-Bretón et al., 2026). Selain itu, bioplastik berbasis pati murni umumnya memiliki kekuatan mekanik dan stabilitas termal yang terbatas sehingga diperlukan berbagai strategi modifikasi, seperti penggunaan plasticizer, *filler*, pencampuran dengan polimer lain, maupun modifikasi kimia untuk meningkatkan performanya (Kumar et al., 2026).

2. Metode Preparasi Bioplastik Berbasis Sagu

Metode preparasi merupakan salah satu faktor penting yang menentukan karakteristik akhir bioplastik berbasis sagu, karena proses pengolahan dapat

memengaruhi struktur molekul pati, interaksi antarkomponen, serta sifat fisik dan mekanik film yang dihasilkan (Guo et al., 2025). Hingga saat ini, metode *solution casting* merupakan teknik yang paling banyak digunakan dalam preparasi bioplastik berbasis pati, termasuk pati sagu, karena prosesnya relatif sederhana, biaya rendah, dan mampu menghasilkan film dengan ketebalan yang seragam (Bangar et al., 2021; Muñoz-Gimena et al., 2023; Murawski et al., 2025; Pelissari et al., 2019).

Metode *solution casting* pada pati sagu terlebih dahulu didispersikan dalam air kemudian mengalami proses gelatinisasi melalui pemanasan pada suhu tertentu. Selama proses ini, granula pati mengalami pembengkakan, pelepasan sebagian molekul amilosa, dan perubahan struktur kristalin sehingga terbentuk pasta pati yang homogen. Selanjutnya, larutan pati dicampurkan dengan plasticizer, seperti gliserol, sorbitol, atau polietilen glikol (PEG), untuk meningkatkan fleksibilitas, mengurangi kerapuhan, serta memperbaiki kemampuan pembentukan film. Larutan yang telah homogen kemudian dituangkan pada permukaan datar dan dikeringkan hingga terbentuk lembaran bioplastik dengan karakteristik yang diinginkan (Fu et al., 2022; González-Torres et al., 2021; Sobeih et al., 2025; Tarique et al., 2021).



Sumber: Disusun oleh penulis berdasarkan berbagai literatur.

Gambar 1. Ilustrasi Preparasi Bioplastik Berbasis Pati Sagu Menggunakan Metode *Solution Casting*

Selain *solution casting*, beberapa penelitian juga mengembangkan metode lain seperti *extrusion* dan teknik pengolahan termoplastik untuk menghasilkan bioplastik berbasis pati dengan skala produksi yang lebih besar (Rahardiyan et al., 2023). Metode *extrusion* memiliki keunggulan berupa proses yang lebih cepat, berkelanjutan, dan lebih sesuai untuk skala industri. Namun, parameter proses seperti suhu, kecepatan ulir (*screw speed*), kadar air, jenis *plasticizer*, dan komposisi

bahan tambahan harus dikontrol secara optimal karena dapat memengaruhi sifat mekanik, stabilitas termal, struktur mikro, serta karakteristik akhir bioplastik yang dihasilkan (de Freitas et al., 2022; Diyana et al., 2021; Montilla-Buitrago et al., 2021; Qiu et al., 2024; Zhang et al., 2024).

Perkembangan terbaru dalam pembuatan bioplastik yang berbasis sagu tidak hanya terpusat pada cara pembuatan film, tetapi juga pada penyempurnaan komposisi dengan pemanfaatan berbagai jenis *plasticizer*, *filler* alami, *nanofiller*, serta kombinasi dengan biopolimer lainnya. Modifikasi tersebut bertujuan untuk meningkatkan kekuatan tarik, fleksibilitas, ketahanan terhadap air, serta stabilitas termal sehingga bioplastik berbasis sagu memiliki peluang yang lebih besar untuk diaplikasikan sebagai material pengemas yang berkelanjutan (Fatima et al., 2024; Nguyen et al., 2024; Santhosh et al., 2024).

3. Pengaruh *Plasticizer* dan *Filler* terhadap Sifat Bioplastik Berbasis Sagu

Bioplastik yang terbuat dari pati sagu memiliki kelemahan utama dalam bentuk kerapuhan, tingkat fleksibilitas yang rendah, serta sensitivitas tinggi terhadap air disebabkan oleh banyaknya gugus hidroksil dalam struktur pati. Oleh karena itu, penambahan *plasticizer* dan *filler* banyak diterapkan sebagai strategi modifikasi untuk meningkatkan sifat fisik, mekanik, termal, dan kemampuan penghalang bioplastik berbasis sagu sehingga lebih sesuai untuk berbagai aplikasi pengemasan berkelanjutan (Costa et al., 2026; Glaser et al., 2026; Zhao et al., 2024).

Plasticizer berfungsi untuk meningkatkan fleksibilitas bioplastik dengan mengurangi gaya tarik antar molekul, antar rantai pati, dan meningkatkan mobilitas rantai polimer (Vieira et al., 2011). Beberapa *plasticizer* yang umum digunakan dalam bioplastik berbasis sagu meliputi gliserol, sorbitol, dan PEG. Penambahan gliserol umumnya meningkatkan nilai elongasi saat putus (*elongation at break*) dan menghasilkan film yang lebih fleksibel, tetapi penggunaan dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan penurunan kekuatan tarik serta peningkatan penyerapan air. Sementara itu, sorbitol dan PEG dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap sifat mekanik, fleksibilitas, dan stabilitas bioplastik, yang dipengaruhi oleh berat molekul, konsentrasi, serta interaksinya dengan matriks pati (Sirbu et al., 2024; Talja et al., 2007; Yermagambetova et al., 2024).

Selain *plasticizer*, penggunaan *filler* atau bahan penguat juga menjadi pendekatan penting dalam pengembangan bioplastik sagu. *Filler* alami seperti serat selulosa, nanoselulosa, kitosan, dan berbagai serat berbasis lignoselulosa telah banyak digunakan karena mampu meningkatkan kekuatan tarik, memperbaiki struktur morfologi, serta meningkatkan stabilitas termal bioplastik. Selain itu, penambahan *nanofiller* seperti nanokristal selulosa dan nanopartikel mineral dapat meningkatkan sifat penghalang terhadap uap air dan gas melalui pembentukan struktur yang lebih rapat di dalam matriks polimer (Bangar & Whiteside, 2021; Basavegowda & Baek, 2021; Dufresne, 2017; Lounis et al., 2024).

Efektivitas *plasticizer* dan *filler* sangat bergantung pada jenis bahan, ukuran partikel, konsentrasi, serta kompatibilitasnya dengan matriks pati sagu. Penambahan

dalam jumlah yang tidak optimal dapat menyebabkan aglomerasi *filler*, menurunkan homogenitas film, atau bahkan menyebabkan penurunan sifat mekanik. Oleh karena itu, optimasi formulasi perlu dilakukan untuk memperoleh keseimbangan antara sifat fleksibilitas, kekuatan mekanik, stabilitas termal, dan ketahanan terhadap air, sehingga kinerja bioplastik berbasis sagu dapat ditingkatkan dan lebih sesuai untuk diaplikasikan sebagai material pengemas yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (Gamage et al., 2024; Marasinghe et al., 2024; Pooja et al., 2024). Pengaruh berbagai jenis *plasticizer* dan *filler* terhadap karakteristik bioplastik berbasis sagu disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Pengaruh Berbagai Jenis *Plasticizer* dan *Filler* terhadap Karakteristik Bioplastik Berbasis Sagu

Jenis bahan tambahan	Pengaruh terhadap sifat bioplastik berbasis sagu	Referensi
Gliserol	Meningkatkan kelenturan dan perpanjangan film dengan cara meningkatkan pergerakan rantai polimer, namun penggunaan pada tingkat tinggi dapat memperbesar penyerapan air dan mengurangi kekuatan mekanik serta karakteristik penghalang film.	Glaser et al. (2026); Pooja et al. (2024); Sirbu et al. (2024).
Sorbitol	Meningkatkan kelenturan dan kemampuan film untuk beradaptasi serta menghasilkan karakteristik mekanis, suhu, dan kestabilan yang berbeda dari gliserol, tergantung pada proporsi dan komposisi yang diterapkan.	Pooja et al. (2024); Sirbu et al. (2024); Yermagambetova et al. (2024).
Kitosan	Meningkatkan daya tarik, memperbaiki morfologi film, serta memberikan karakteristik fungsional seperti kemampuan antimikroba dan potensi dalam menghambat pertumbuhan mikroba.	Basavegowda & Baek (2021); Fatima et al. (2024); Marasinghe et al. (2024).
Selulosa dan mikrokristalin selulosa (MCC)	Selulosa dan MCC berperan sebagai bahan penguat yang memperkuat kekuatan mekanik, memperbaiki integritas matriks bioplastik, serta meningkatkan stabilitas dan sifat penghalang pada material.	Bangar & Whiteside (2021); Basavegowda & Baek (2021); Dufresne (2017).
Clay dan ZnO	Meningkatkan karakteristik mekanik, memperbaiki bentuk dan struktur matriks, serta memperkuat stabilitas dan kemampuan penghalang bioplastik terhadap uap air dan gas.	(Basavegowda & Baek (2021); Gamage et al. (2024); Marasinghe et al. (2024).

4. Karakteristik dan Performa Bioplastik Berbasis Sagu

Karakterisasi adalah langkah krusial dalam menilai mutu dan kemampuan penggunaan bioplastik yang terbuat dari sagu. Karakteristik dan performa bioplastik berbasis sagu dipengaruhi oleh berbagai faktor, meliputi komposisi pati, jenis dan

konsentrasi plasticizer, penggunaan filler, serta kondisi selama proses pembuatan. Untuk mengevaluasi kualitas material yang dihasilkan, berbagai metode karakterisasi diterapkan, mencakup pengujian sifat fisik, mekanik, termal, morfologi, dan biodegradabilitas (Cheng et al., 2021; Jiménez et al., 2012; Kargupta et al., 2025; Rashwan et al., 2024).

4.1 Sifat fisik

Sifat fisik seperti ketebalan, kepadatan, kejernihan, kandungan air, kelarutan, dan daya serap air merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kualitas bioplastik berbasis sagu. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa sifat fisik tersebut dipengaruhi oleh struktur pati, jenis dan konsentrasi *plasticizer*, serta penggunaan *filler* (Las-Casas & Arantes, 2024; Marta et al., 2022; Vasseghian et al., 2022). Penambahan *plasticizer* dapat meningkatkan fleksibilitas film, tetapi juga berpotensi meningkatkan sifat hidrofilik sehingga menyebabkan kadar air, kelarutan, dan penyerapan air cenderung meningkat. Sebaliknya, penambahan *filler* dapat memperbaiki struktur matriks bioplastik, meningkatkan interaksi antar komponen, serta mengurangi permeabilitas dan penyerapan air melalui pembentukan struktur yang lebih rapat. Dengan demikian, kombinasi jenis dan konsentrasi *plasticizer* maupun *filler* menjadi faktor penting dalam menentukan sifat fisik bioplastik berbasis sagu sesuai dengan kebutuhan aplikasinya. Perbedaan hasil antarpelitian menunjukkan bahwa optimasi jenis dan konsentrasi *plasticizer* maupun *filler* menjadi faktor kunci dalam mengendalikan sifat fisik bioplastik berbasis pati sagu sesuai dengan kebutuhan aplikasinya.

4.2 Sifat mekanik

Sifat mekanik, terutama kekuatan tarik (*tensile strength*) dan perpanjangan saat putus (*elongation at break*), merupakan parameter utama dalam menentukan kelayakan bioplastik berbasis sagu untuk diaplikasikan sebagai bahan kemasan. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanik bioplastik berbasis sagu dipengaruhi oleh komposisi pati, jenis dan konsentrasi *plasticizer*, serta penggunaan *filler* (Azadi et al., 2020; Othman et al., 2024; Schutz et al., 2024; Zamora et al., 2024). Bioplastik berbasis sagu memiliki kekuatan mekanik yang relatif rendah akibat sifat alami pati yang cenderung rapuh, sehingga diperlukan penambahan *plasticizer* dan *filler* untuk meningkatkan performa mekaniknya. Secara umum, penambahan *plasticizer* seperti gliserol dapat meningkatkan fleksibilitas dan *elongation at break* film, sedangkan penggunaan *filler* seperti selulosa dan kitosan berperan sebagai bahan penguat yang mampu meningkatkan kekuatan tarik melalui penguatan struktur matriks serta peningkatan interaksi antar muka dalam sistem polimer. Namun, peningkatan fleksibilitas akibat penambahan *plasticizer* umumnya diikuti oleh penurunan kekuatan tarik, sehingga diperlukan optimasi jenis dan konsentrasi *plasticizer* maupun *filler* untuk memperoleh keseimbangan antara fleksibilitas dan kekuatan mekanik sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

Beberapa penelitian seperti Azadi et al., 2020; Azimi et al., 2025; dan Gautama et al., 2025, menunjukkan variasi nilai sifat mekanik bioplastik berbasis sagu yang dipengaruhi oleh komposisi bahan, jenis *plasticizer*, dan penggunaan filler. Perbandingan kuantitatif sifat mekanik bioplastik berbasis pati sagu dari berbagai penelitian disajikan pada Tabel 2.

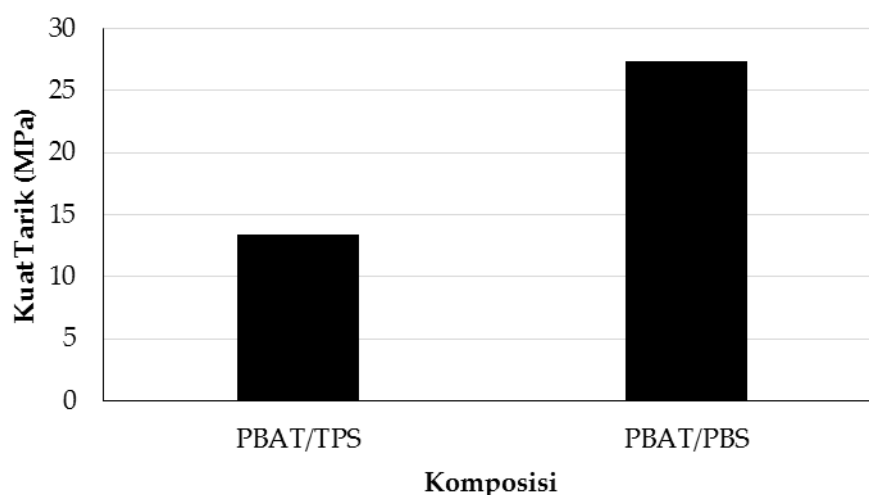
Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa modifikasi komposisi dan perlakuan seperti *heat moisture treatment* (HMT) maupun penambahan polimer lain secara signifikan memengaruhi performa bioplastik. Peningkatan biodegradabilitas umumnya diikuti oleh penurunan sifat mekanik, yang menunjukkan adanya *trade-off* antara kekuatan material dan kemampuan degradasi.

Tabel 2. Perbandingan Kuantitatif Sifat Mekanik dan Performa Bioplastik Berbasis Pati Sagu dari Berbagai Penelitian

Peneliti	Komposisi	Kuat Tarik (MPa)	Elongasi (%)	WVTR	Biodegradasi	Keterangan
Azadi et al.(2020)	Pati sagu HMT	-	-	↓ 10%	16% → 34% (9 hari)	stabilitas meningkat
Gautama et al. (2025)	Pati sagu + UV exposure	-	-	-	-	degradasi morfologi meningkat
Azimi et al. (2025)	PBAT/TPS; PBAT/PBS	13,41 (TPS); 27,37 (PBS)	-	-	30% (TPS, 90 hari)	TPS ↓ kekuatan, ↑ biodegradasi

Keterangan: HMT = *Heat moisture treatment*; UV = Ultra violet; PBAT/TPS = Poly(butylene-adipate-co-terephthalate) thermoplastic starch; polybutylene succinate (PBAT/PBS); WVTR = *water vapour transmission rate*

Untuk memperjelas perbedaan nilai kuat tarik antar komposisi, data divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan Kuat Tarik Bioplastik Berbasis Pati Sagu Pada Berbagai Komposisi

4.3 Sifat termal

Karakteristik sifat termal bioplastik umumnya dianalisis menggunakan *thermogravimetric analysis* (TGA) dan *differential scanning calorimetry* (DSC). Secara umum, penelitian terdahulu melaporkan bahwa karakteristik termal bioplastik berbasis sagu dipengaruhi oleh komposisi pati, jenis dan konsentrasi *plasticizer*, serta penggunaan *filler* (Latos-Brozio et al., 2025; Raghunathan et al., 2025; Salehiyan & Bakhtiari, 2024). Analisis ini memberikan informasi mengenai stabilitas termal, suhu transisi, serta perilaku degradasi material.

Penambahan *filler* umumnya dapat meningkatkan stabilitas termal bioplastik dengan membatasi mobilitas rantai polimer dan memperkuat struktur matriks, serta meningkatkan interaksi antarkomponen sehingga material menjadi lebih tahan terhadap degradasi termal. Dengan demikian, karakteristik termal bioplastik berbasis sagu sangat dipengaruhi oleh formulasi material, terutama jenis dan konsentrasi *plasticizer* maupun *filler*, sehingga keduanya berperan penting dalam meningkatkan stabilitas termal sesuai kebutuhan aplikasinya. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian sifat termal menjadi aspek penting dalam pengembangan bioplastik berbasis sagu, terutama untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan terhadap suhu tertentu.

4.4 Morfologi

Karakterisasi morfologi umumnya dilakukan menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi permukaan dan struktur internal material. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa morfologi bioplastik berbasis sagu dipengaruhi oleh kompatibilitas antara pati, *plasticizer*, dan *filler* (Gautama et al., 2025; Nasir & Othman, 2024; Nazrin et al., 2025; Tabassum et al., 2025). Film dengan permukaan yang homogen serta retakan yang minimal menunjukkan distribusi komponen yang lebih baik dan interaksi yang lebih kuat antara pati, *plasticizer*, dan *filler*. Sebaliknya, dispersi *filler* yang kurang homogen dan terbentuknya aglomerasi dapat menurunkan kualitas bioplastik melalui pelemahan struktur matriks, sehingga berdampak negatif terhadap sifat mekanik dan sifat penghalang material. Dengan demikian, morfologi yang homogen menjadi indikator penting keberhasilan pembentukan matriks bioplastik berbasis sagu serta berkontribusi terhadap peningkatan performa material secara keseluruhan.

4.5 Biodegradabilitas

Biodegradabilitas merupakan salah satu keunggulan utama bioplastik berbasis sagu karena material ini dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme di lingkungan. Mayoritas penelitian menunjukkan bahwa laju biodegradasi bioplastik berbasis sagu dipengaruhi oleh komposisi bahan, tingkat kristalinitas, kondisi lingkungan, serta modifikasi formulasi yang memengaruhi struktur matriks polimer (Chauhan et al., 2024; Hemmami et al., 2025; Nizamuddin et al., 2024). Secara umum, peningkatan kandungan pati cenderung mempercepat proses degradasi karena pati mudah dimanfaatkan oleh mikroorganisme, sedangkan penambahan *filler* atau modifikasi

tertentu dapat memperlambat degradasi akibat terbentuknya struktur yang lebih rapat dan stabil sehingga menghambat penetrasi air dan aktivitas mikroba terhadap matriks polimer. Dengan demikian, laju biodegradasi bioplastik berbasis sagu dipengaruhi oleh keseimbangan antara komposisi bahan penyusun dan struktur matriks, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi serta umur pakai produk.

5. Tantangan dan Perspektif Masa Depan

Meskipun bioplastik berbasis sagu memiliki potensi yang besar sebagai alternatif ramah lingkungan terhadap plastik berbasis petrokimia, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi sebelum material ini dapat diaplikasikan secara luas dalam skala komersial (Lawal et al., 2026). Salah satu kendala utama adalah rendahnya sifat mekanik, tingginya sensitivitas terhadap kelembapan, serta keterbatasan stabilitas termal yang berasal dari sifat alami pati yang bersifat hidrofilik. Selain itu, variasi karakteristik pati sagu yang dipengaruhi oleh sumber bahan baku, kondisi pertumbuhan, faktor lingkungan, serta metode ekstraksi dapat menyebabkan perbedaan sifat fisikokimia pati, yang pada akhirnya memengaruhi kualitas dan karakteristik bioplastik yang dihasilkan (Wang & Tong, 2024; Xie et al., 2025; Yan et al., 2024).

Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk mengatasi keterbatasan tersebut, seperti penggunaan *plasticizer* dengan konsentrasi yang optimal, penambahan bahan penguat alami dan nanofiller, modifikasi pati melalui perlakuan fisik maupun kimia, serta pengembangan biokomposit berbasis campuran beberapa biopolimer (Emanratu et al., 2025). Berbagai strategi modifikasi, seperti penambahan *plasticizer*, *filler*, dan *nanofiller*, telah terbukti meningkatkan kekuatan mekanik, memperbaiki sifat penghalang terhadap air dan gas, serta meningkatkan stabilitas termal bioplastik berbasis sagu. Peningkatan karakteristik tersebut memperluas potensi pemanfaatan bioplastik sagu pada bidang pengemasan, pertanian, dan berbagai aplikasi lainnya (Amobonye et al., 2025; Azadi et al., 2020; Chodak & Peidayesh, 2025; Mishra et al., 2024; Siddiqui et al., 2024).

Selain peningkatan performa material, aspek keberlanjutan lingkungan dan kelayakan ekonomi juga menjadi faktor penting yang menentukan keberhasilan pengembangan bioplastik berbasis sagu pada skala industri. Berbagai kajian menunjukkan bahwa penerapan analisis siklus hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*) pada bioplastik berbasis pati umumnya memberikan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan plastik berbasis petrokimia karena memanfaatkan bahan baku terbarukan dan mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya fosil. Namun, hasil LCA perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti sumber bahan baku, proses produksi, serta skenario pengelolaan akhir masa pakai (*end-of-life*). Walker & Rothman (2020) melaporkan bahwa hasil perbandingan LCA antara bioplastik dan plastik berbasis petrokimia dapat bervariasi hingga sekitar 400% akibat perbedaan metodologi dan asumsi yang digunakan. Selain itu, konsumsi energi selama proses gelatinisasi, pengeringan, serta produksi

bahan aditif seperti *plasticizer* dan *filler* masih memberikan kontribusi yang signifikan terhadap dampak lingkungan. Molina-Besch (2022) melalui telaah terhadap 42 studi LCA, menemukan bahwa tahap penggunaan (*use phase*) dan pemodelan *end-of-life* pada bioplastik masih sering menggunakan data yang belum spesifik terhadap jenis material yang dikaji. Oleh karena itu, efisiensi proses produksi serta ketersediaan data yang representatif perlu terus ditingkatkan. Temuan tersebut sejalan dengan Shen (2022) yang menjelaskan bahwa meskipun bioplastik berbasis hayati berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya fosil dan emisi gas rumah kaca, material tersebut tetap memiliki berbagai *environmental trade-offs* yang perlu dipertimbangkan dalam LCA.

Dari sisi ekonomi, ketersediaan pati sagu yang melimpah di wilayah tropis, khususnya Indonesia, menjadi keunggulan sebagai bahan baku yang relatif murah. Namun, biaya produksi bioplastik masih dipengaruhi oleh penggunaan bahan aditif, proses modifikasi, serta kebutuhan energi selama proses manufaktur. Oleh karena itu, pemanfaatan bahan penguat alami dari limbah biomassa, optimalisasi formulasi, dan penerapan teknologi produksi yang lebih hemat energi berpotensi menekan biaya produksi sekaligus meningkatkan daya saing bioplastik berbasis sagu dibandingkan plastik konvensional.

Selain itu, strategi komersialisasi perlu diarahkan pada pengembangan rantai pasok berbasis sumber daya lokal, peningkatan kapasitas produksi pada skala industri, penyusunan standar mutu produk, serta dukungan kebijakan pemerintah melalui insentif bagi industri bioplastik dan peningkatan kesadaran masyarakat terhadap penggunaan material ramah lingkungan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat mempercepat adopsi bioplastik berbasis sagu sebagai alternatif yang berkelanjutan dan memiliki daya saing di pasar.

Perkembangan teknologi nanomaterial, rekayasa biopolimer, dan teknik modifikasi pati diharapkan dapat menghasilkan bioplastik berbasis sagu dengan kombinasi sifat mekanik, termal, dan sifat penghalang yang lebih baik tanpa mengurangi kemampuan biodegradasinya (D'Almeida & de Albuquerque, 2024). Integrasi teknologi produksi yang lebih modern dengan pemanfaatan sumber daya sagu yang melimpah, khususnya di wilayah tropis, memberikan peluang besar bagi pengembangan bioplastik berkelanjutan sebagai pengganti plastik berbasis bahan bakar fosil di masa mendatang.

SIMPULAN

Perkembangan penelitian mengenai bioplastik berbasis pati sagu menunjukkan bahwa material ini memiliki potensi yang besar sebagai alternatif berkelanjutan pengganti plastik berbasis petrokimia. Berbagai metode preparasi, terutama *solution casting*, serta pengembangan teknik pengolahan pati termoplastik telah memungkinkan pembentukan bioplastik dengan karakteristik yang semakin baik. Selain itu, penggunaan *plasticizer*, *filler* alami, dan *nanofiller* terbukti berperan penting

dalam meningkatkan fleksibilitas, kekuatan mekanik, stabilitas termal, dan sifat penghalang bioplastik berbasis sago.

Meskipun demikian, penerapan bioplastik berbasis sago dalam skala yang lebih luas masih menghadapi beberapa tantangan, terutama terkait sensitivitas terhadap kelembapan, keterbatasan performa mekanik, serta efisiensi produksi pada skala industri. Oleh karena itu, penelitian di masa depan perlu difokuskan pada pengembangan formulasi bioplastik yang memiliki ketahanan terhadap kelembapan lebih baik tanpa mengurangi kemampuan biodegradasinya, penerapan metode produksi yang lebih efisien dan hemat energi, serta evaluasi LCA dan kelayakan ekonomi (*techno-economic analysis*) untuk mendukung komersialisasi bioplastik berbasis sago. Integrasi teknologi material maju dan pemanfaatan sumber daya sago secara berkelanjutan diharapkan dapat mempercepat pengembangan bioplastik berbasis sago sebagai material ramah lingkungan untuk berbagai aplikasi, terutama pada sektor pengemasan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu Ubaidah, A. S., Mohamad Puad, N. I., Hamzah, F., Azmi, A. S., & Ahmad Nor, Y. (2024). Synthesis of bioplastics and the effects of additives on the mechanical, thermal and biodegradable properties. *Polymers from Renewable Resources*, 15(4), 430–490. <https://doi.org/10.1177/20412479241292148>
- Akuyenze, P., Ssenku, J. E., Masawi, A. N., Kawongolo, J. B., & Muranga, F. I. (2025). Revolutionizing starch modification: the role of genetic engineering in enhancing starch properties for sustainable industrial applications – A review. *Discover Biotechnology*, 2(1), 28. <https://doi.org/10.1007/s44340-025-00033-y>
- AL-Fakih, Ghassan. O. A., Ilyas, R. A., Huzaifah, M. R. M., & El-Shafay, A. S. (2024). Recent advances in sago (Metroxylon sago) fibres, biopolymers, biocomposites, and their prospective applications in industry: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 269, 132045. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132045>
- Amobonye, A., Bendoraitiene, J., Peciulyte, L., & Rutkaite, R. (2025). Review of recent advancements in starch modification: Improving the functionality of starch-based films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 315, 144354. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144354>
- Ansanay, Y. O., Runtuboi, D. Y. P., & Wiradyo, E. T. (2022). Potency of Utilizing Sago Starch as Natural Resource from Papua in the Production of Biodegradable Plastic. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 12(1), 353–358. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.1.14267>
- Avérous, L. (2004). Biodegradable Multiphase Systems Based on Plasticized Starch: A Review. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 44(3), 231–274. <https://doi.org/10.1081/MC-200029326>

- Azimi NR, Sonchaeng U, Leelaphiwat P, Tongdeesoontorn W, Bumbudsanpharoke N. Comparative study of packaging performance: Thermoplastic starch blends and polyester blends for biodegradable personal care packaging. *Int J Biol Macromol.* 2025 Aug;320(Pt 1):145739. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.145739. Epub 2025 Jul 3. PMID: 40614991.
- Azadi, A., Supriyadi, S., & Herawati, H. (2020). Starch Based Biocomposite from Sago (Metroxylon sagu) with Nano-Chitosan reinforcement: Mechanical and Thermal Characteristics. *The Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, 9(2), 98–107. <https://doi.org/10.21776/ub.jpacr.2020.009.02.516>
- Bangar, S. P., Purewal, S. S., Trif, M., Maqsood, S., Kumar, M., Manjunatha, V., & Rusu, A. V. (2021). Functionality and Applicability of Starch-Based Films: An Eco-Friendly Approach. *Foods*, 10(9), 2181. <https://doi.org/10.3390/foods10092181>
- Bangar, S. P., & Whiteside, W. S. (2021). Nano-cellulose reinforced starch bio composite films- A review on green composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, 849–860. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.017>
- Basavegowda, N., & Baek, K.-H. (2021). Advances in Functional Biopolymer-Based Nanocomposites for Active Food Packaging Applications. *Polymers*, 13(23), 4198. <https://doi.org/10.3390/polym13234198>
- Chakraborty, I., N, P., Mal, S. S., Paul, U. C., Rahman, Md. H., & Mazumder, N. (2022). An Insight into the Gelatinization Properties Influencing the Modified Starches Used in Food Industry: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 15(6), 1195–1223. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02761-z>
- Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2024). Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(8), 913–938. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2307369>
- Cheng, H., Chen, L., McClements, D. J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., ... Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.017>
- Chodak, I., & Peidayesh, H. (2025). Modification of Thermoplastic Starch to Achieve a Broad Range of Properties in Mixture With Biodegradable Polymers. *Macromolecular Symposia*, 414(6). <https://doi.org/10.1002/masy.70251>
- Costa, M. E., Sarinho, A. M., Lima, J., Andrade, R., Baptista, L., Almeida, R. D., & Lisboa, H. M. (2026). Chemical modification of starch for high-performance bioplastics: A critical review of structure–property relationships and scalable

- p processing.
- Carbohydrate Polymers*
- , 378, 124906.
-
- <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2026.124906>
- D'Almeida, A. P., & de Albuquerque, T. L. (2024). Innovations in Food Packaging: From Bio-Based Materials to Smart Packaging Systems. *Processes*, 12(10), 2085.
<https://doi.org/10.3390/pr12102085>
- de Freitas, A. de S. M., da Silva, A. P. B., Montagna, L. S., Nogueira, I. A., Carvalho, N. K., de Faria, V. S., ... Lemes, A. P. (2022). Thermoplastic starch nanocomposites: sources, production and applications – a review. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 33(7), 900–945.
<https://doi.org/10.1080/09205063.2021.2021351>
- Dhalsamant, K., Dalai, A., Pattnaik, F., & Acharya, B. (2025). Biodegradable Carbohydrate-Based Films for Packaging Agricultural Products—A Review. *Polymers*, 17(10), 1325. <https://doi.org/10.3390/polym17101325>
- Diyana, Z. N., Jumaidin, R., Selamat, M. Z., Ghazali, I., Julmohammad, N., Huda, N., & Ilyas, R. A. (2021). Physical Properties of Thermoplastic Starch Derived from Natural Resources and Its Blends: A Review. *Polymers*, 13(9), 1396.
<https://doi.org/10.3390/polym13091396>
- Dufresne, A. (2017). Cellulose nanomaterial reinforced polymer nanocomposites. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 29, 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.cocis.2017.01.004>
- Dutta, D., & Sit, N. (2024). Comprehensive review on developments in starch-based films along with active ingredients for sustainable food packaging. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, 101534. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101534>
- Emanratu, J. D., Santoso, B., & Angela Myrra Puspita Dewi. (2025). Bioplastic Synthesis based on Modified Heat Moisture Treatment (HMT) Sago Starch (Metroxylon Sp) and its Application as Powdered Coffee Packaging. *Journal of Food and Agricultural Product*, 5(1), 83–91.
<https://doi.org/10.32585/jfap.v5i1.6409>
- Fan, Y., & Picchioni, F. (2020). Modification of starch: A review on the application of “green” solvents and controlled functionalization. *Carbohydrate Polymers*, 241, 116350. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116350>
- Fatima, S., Khan, M. R., Ahmad, I., & Sadiq, M. B. (2024). Recent advances in modified starch based biodegradable food packaging: A review. *Heliyon*, 10(6), e27453.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27453>
- Fu, J., Alee, M., Yang, M., Liu, H., Li, Y., Li, Z., & Yu, L. (2022). Synergizing Multi-Plasticizers for a Starch-Based Edible Film. *Foods*, 11(20), 3254.
<https://doi.org/10.3390/foods11203254>
- Gamage, A., Thiviya, P., Liyanapathirana, A., Wasana, M. L. D., Jayakodi, Y., Bandara, A., ... Madhujith, T. (2024). Polysaccharide-Based Bioplastics: Eco-

- Friendly and Sustainable Solutions for Packaging. *Journal of Composites Science*, 8(10), 413. <https://doi.org/10.3390/jcs8100413>
- Gautama, P., Sulaeman, B., & Nurhidayanti, N. (2025). Morphological Degradation of Sago Starch (Metroxylon sp.) Bioplastic of Palopo, South Sulawesi. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology*, 9(4), 594–604. <https://doi.org/10.55043/jaast.v9i4.501>
- Glaser, S. J., Faisal, M., Blennow, A., & Lo Leggio, L. (2026). Additives as external plasticizers in starch-based bioplastics - towards improving the properties of food packaging: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 335, 148754. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.148754>
- González-Torres, B., Robles-García, M. Á., Gutiérrez-Lomelí, M., Padilla-Frausto, J. J., Navarro-Villarruel, C. L., Del-Toro-Sánchez, C. L., ... Reynoso-Marín, F. J. (2021). Combination of Sorbitol and Glycerol, as Plasticizers, and Oxidized Starch Improves the Physicochemical Characteristics of Films for Food Preservation. *Polymers*, 13(19), 3356. <https://doi.org/10.3390/polym13193356>
- Guleria, S., Singh, H., Jain, A., Arya, S. K., Puri, S., & Khatri, M. (2024). Response surface methodology-based preparation of sago starch bioplastic film for food packaging. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 29(7), 478–495. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2024.2383480>
- Guo, Y., Liu, M., Chuang, R., Zhang, H., Li, H., Xu, L., ... Ghamry, M. (2025). Mechanistic applications of low-temperature plasma in starch-based biopolymer film: A review. *Food Chemistry*, 479, 143739. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143739>
- Hemmami, H., Zeghoud, S., Ben Amor, I., Ben Amor, A., Alnazza Alhamad, A., & Messaoudi, M. (2025). Biodegradation of bioplastics based on natural polymers: a review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 105(18), 6482–6509. <https://doi.org/10.1080/03067319.2024.2423017>
- Horn, M. M., Martins, V. C. A., & Plepis, A. M. G. (2023). Effect of Amylopectin Content on Mechanical, Barrier and Thermal Properties of Plasticized Starch/Chitosan Films. *Polysaccharides*, 4(3), 208–218. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides4030015>
- Hossain, Md. T., Shahid, Md. A., Akter, S., Ferdous, J., Afroz, K., Refat, K. R. I., ... Samad, Md. A. Bin. (2024). Cellulose and starch-based bioplastics: a review of advances and challenges for sustainability. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(10), 1329–1349. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2329980>
- Jayarathna, S., Andersson, M., & Andersson, R. (2022). Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics Applications. *Polymers*, 14(21), 4557. <https://doi.org/10.3390/polym14214557>

- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012). Edible and Biodegradable Starch Films: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2058–2076. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0835-4>
- Jin, J., Luo, B., Xuan, S., Shen, P., Jin, P., Wu, Z., & Zheng, Y. (2024). Degradable chitosan-based bioplastic packaging: Design, preparation and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 266, 131253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131253>
- Kargupta, T., Pooja, N., Rahman, Md. H., Vij, I., Biswas, R., Roy, S., & Mazumder, N. (2025). An insight into thermal, chemical, and structural characterization of biopolymers. *Discover Applied Sciences*, 7(8), 865. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07549-2>
- Kumar, A., Saranyadevi, S., Selva Kumar, T., Neupane, S., Pawde, S. V., Liu, S., ... Wei, S. (2026). Starch based biodegradable packaging systems and their interactions with food components, shelf-life implications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 13, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.101067>
- Las-Casas, B., & Arantes, V. (2024). From production to performance: Tailoring moisture and oxygen barrier of cellulose nanomaterials for sustainable applications – A review. *Carbohydrate Polymers*, 334, 122012. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122012>
- Latos-Brozio, M., Rułka, K., & Masek, A. (2025). Review of Bio-Fillers Dedicated to Polymer Compositions. *Chemistry & Biodiversity*, 22(8). <https://doi.org/10.1002/cbdv.202500406>
- Lawal, N., Adeleke, A., Nzerem, P., Adewumi, C., Ogundolie, F., Anosike-Francis, E., ... Jesuloluwa, S. (2026). Recent Advances, Challenges, and Analytical Perspectives in Starch-Based Bioplastics. *Journal of Renewable Materials*, 0(0), 1–10. <https://doi.org/10.32604/jrm.2026.02025-0203>
- Lounis, F. M., Benhacine, F., & Hadj-Hamou, A. S. (2024). Improving water barrier properties of starch based bioplastics by lignocellulosic biomass addition: Synthesis, characterization and antibacterial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283, 137823. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137823>
- Marasinghe, W. N., Jayathunge, K. G. L. R., Dassanayake, R. S., Liyanage, R., Bandara, P. C., Rajapaksha, S. M., & Gunathilake, C. (2024). Structure, Properties, and Recent Developments in Polysaccharide- and Aliphatic Polyester-Based Packaging—A Review. *Journal of Composites Science*, 8(3), 114. <https://doi.org/10.3390/jcs8030114>
- Marta, H., Wijaya, C., Sukri, N., Cahyana, Y., & Mohammad, M. (2022). A Comprehensive Study on Starch Nanoparticle Potential as a Reinforcing

- Material in Bioplastic. *Polymers*, 14(22), 4875.
<https://doi.org/10.3390/polym14224875>
- Mishra, B., Panda, J., Mishra, A. K., Nath, P. C., Nayak, P. K., Mahapatra, U., ... Sridhar, K. (2024). Recent advances in sustainable biopolymer-based nanocomposites for smart food packaging: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135583.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135583>
- Molina-Besch, K. (2022). Use phase and end-of-life modeling of biobased biodegradable plastics in life cycle assessment: a review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(10), 3253–3272. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02373-3>
- Montilla-Buitrago, C. E., Gómez-López, R. A., Solanilla-Duque, J. F., Serna-Cock, L., & Villada-Castillo, H. S. (2021). Effect of Plasticizers on Properties, Retrogradation, and Processing of Extrusion-Obtained Thermoplastic Starch: A Review. *Starch - Stärke*, 73(9–10). <https://doi.org/10.1002/star.202100060>
- Muñoz-Gimena, P. F., Oliver-Cuenca, V., Peponi, L., & López, D. (2023). A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging. *Polymers*, 15(13), 2972. <https://doi.org/10.3390/polym15132972>
- Murawski, T. T., Żółek-Tryznowska, Z., & Szałapak, J. (2025). Impact of Substrate Type on the Properties of Cast Biodegradable Starch-Based Films. *Processes*, 13(4), 1197. <https://doi.org/10.3390/pr13041197>
- Nasir, N. N., & Othman, S. A. (2024). A review: Effect of organic and inorganic filler on starch-based bioplastic. In *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Material Engineering & Technology (ICAMET 2023)* (p. 020050). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0195125>
- Nawab, A., Alam, F., Haq, M. A., & Hasnain, A. (2016). Biodegradable film from mango kernel starch: Effect of plasticizers on physical, barrier, and mechanical properties. *Starch - Stärke*, 68(9–10), 919–928.
<https://doi.org/10.1002/star.201500349>
- Nazrin, A., Ilyas, R. A., Rajeshkumar, L., Hazrati, K. Z., Jamal, T., Mahardika, M., ... Radzi, A. M. (2025). Lignocellulosic fiber-reinforced starch thermoplastic composites for food packaging application: A review of properties and food packaging abetted with safety aspects. *Food Packaging and Shelf Life*, 47, 101431.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101431>
- Nguyen, M. T. P., Escribà-Gelonch, M., Hessel, V., & Coad, B. R. (2024). A Review of the Current and Future Prospects for Producing Bioplastic Films Made from Starch and Chitosan. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(5), 1750–1768. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c06094>

- Ningrum, R. S., Rosalina, R., Sondari, D., Fazriyah, L., Putri, R., & Amanda, P. (2023). Physicochemical Properties of Sago Starch Fractionated by Butanol. *Starch - Stärke*, 75(3–4). <https://doi.org/10.1002/star.202200157>
- Nizamuddin, S., Baloch, A. J., Chen, C., Arif, M., & Mubarak, N. M. (2024). Bio-based plastics, biodegradable plastics, and compostable plastics: biodegradation mechanism, biodegradability standards and environmental stratagem. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 195, 105887. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105887>
- Núñez-Bretón, L. C., Cooper-Bribiesca, B. L., Medina-Torres, L., Rosas-Flores, W., González-Jiménez, F. E., Cruz-Orea, A., & Manero, O. (2026). Recent developments of multiple functionalization of starches: A review of physical, chemical, and enzymatic modifications and their industrial applications. *Journal of Food Measurement and Characterization*. <https://doi.org/10.1007/s11694-026-04300-2>
- Othman, S. H., Shapi'i, R. A., & Ronzi, N. D. A. (2024). Starch biopolymer films containing chitosan nanoparticles: A review. *Carbohydrate Polymers*, 329, 121735. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121735>
- Pawase, P. A., Pathare, A. M., Bashir, O., Saleem, F., Shrama, E., Mudgal, S., & Ahmad, M. (2025). Physical, chemical, and nano-enabled modifications of starch for sustainable food packaging films: recent trends, challenges, and prospects. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 11, 100986. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100986>
- Pelissari, F. M., Ferreira, D. C., Louzada, L. B., dos Santos, F., Corrêa, A. C., Moreira, F. K. V., & Mattoso, L. H. (2019). Starch-Based Edible Films and Coatings. In *Starches for Food Application* (pp. 359–420). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00010-1>
- Pooja, N., Shashank, S., Singh, B. N., & Mazumder, N. (2024). Advancing sustainable bioplastics: chemical and physical modification of starch films for enhanced thermal and barrier properties. *RSC Advances*, 14(33), 23943–23951. <https://doi.org/10.1039/D4RA04263H>
- Qiu, C., Hu, H., Chen, B., Lin, Q., Ji, H., & Jin, Z. (2024). Research Progress on the Physicochemical Properties of Starch-Based Foods by Extrusion Processing. *Foods*, 13(22), 3677. <https://doi.org/10.3390/foods13223677>
- Raghunathan, R., Jeevarathinam, G., Vadukkumchery Prasannan, M., Rustagi, S., & Asdaq, S. M. B. (2025). Starch-Based Polymer Composites for Sustainable Food Packaging: Advances in Bioplastic Development. *Starch - Stärke*, 77(9). <https://doi.org/10.1002/star.70092>
- Rahardiyani, D., Moko, E. M., Tan, J. S., & Lee, C. K. (2023). Thermoplastic starch (TPS) bioplastic, the green solution for single-use petroleum plastic food

- packaging – A review. *Enzyme and Microbial Technology*, 168, 110260. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2023.110260>
- Rajeshkumar, L., Ramesh, M., Bhuvaneswari, V., Balaji, D., & Deepa, C. (2023). Synthesis and thermomechanical properties of bioplastics and biocomposites: a systematic review. *Journal of Materials Chemistry B*, 11(15), 3307–3337. <https://doi.org/10.1039/D2TB02221D>
- Rashwan, A. K., Younis, H. A., Abdelshafy, A. M., Osman, A. I., Eletmany, M. R., Hafouda, M. A., & Chen, W. (2024). Plant starch extraction, modification, and green applications: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(5), 2483–2530. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01753-z>
- Salehiyan, R., & Soleymani Eil Bakhtiari, S. (2024). A review on rheological approaches as a perfect tool to monitor thermal degradation of biodegradable polymers. *Korea-Australia Rheology Journal*, 36(4), 295–317. <https://doi.org/10.1007/s13367-024-00111-3>
- Santhosh, R., Ahmed, J., Thakur, R., & Sarkar, P. (2024). Starch-based edible packaging: rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties – a review. *Sustainable Food Technology*, 2(2), 307–330. <https://doi.org/10.1039/D3FB00211J>
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2016). Effect of plasticizer type and concentration on physical properties of biodegradable films based on sugar palm (arenga pinnata) starch for food packaging. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 326–336. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2009-7>
- Schutz, G. F., de Ávila Gonçalves, S., Alves, R. M. V., & Vieira, R. P. (2024). A review of starch-based biocomposites reinforced with plant fibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 261, 129916. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129916>
- Shanmugam, V., Kaynak, E., Das, O., & Padhye, L. P. (2026). Environmental performance of bioplastics: degradation pathways, chemical leaching, and life-cycle implications. *Npj Materials Sustainability*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.1038/s44296-026-00096-w>
- Shen, L. (2022). Life Cycle Assessment of Bio-Based Plastics: Concepts, Findings, and Pitfalls. In *Biodegradable Polymers in the Circular Plastics Economy* (pp. 409–439). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527827589.ch13>
- Siddiqui, S. A., Yang, X., Deshmukh, R. K., Gaikwad, K. K., Bahmid, N. A., & Castro-Muñoz, R. (2024). Recent advances in reinforced bioplastics for food packaging – A critical review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130399. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130399>

- Silviana, S., & Dalanta, F. (2024). Recent developments in sago starch thermoplastic bio-composites. *Physical Sciences Reviews*, 9(3), 1213–1236. <https://doi.org/10.1515/psr-2022-0017>
- Sirbu, E.-E., Dinita, A., Tănase, M., Portoacă, A.-I., Bondarev, A., Enascuta, C.-E., & Calin, C. (2024). Influence of Plasticizers Concentration on Thermal, Mechanical, and Physicochemical Properties on Starch Films. *Processes*, 12(9), 2021. <https://doi.org/10.3390/pr12092021>
- Sobeih, M. O., Sawalha, S., Hamed, R., Ali, F., & Kim, M. P. (2025). Starch-Derived Bioplastics: Pioneering Sustainable Solutions for Industrial Use. *Materials*, 18(8), 1762. <https://doi.org/10.3390/ma18081762>
- Sulaeman, B., Salam, N., Putra, A. E. E., & Arma, L. H. (2023). Development of bioplastics from Tawaro's environmentally friendly sago starch (metroxylon). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(12 (125)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289626>
- Swetha, T. A., Bora, A., Ananth, V., Ponnuchamy, K., Muthusamy, G., & Arun, A. (2024). A review of bioplastics as an alternative to petrochemical plastics: Its types, structure, characteristics, degradation, standards, and feedstocks. *Polymers for Advanced Technologies*, 35(6). <https://doi.org/10.1002/pat.6482>
- Tabassum, Z., Girdhar, M., Anand, A., Kumari, N., Sood, B., Malik, T., ... Mohan, A. (2025). Trash to treasure: advancing resource efficiency using waste-derived fillers as sustainable reinforcing agents in bioplastics. *Materials Advances*, 6(2), 527–546. <https://doi.org/10.1039/D4MA01043D>
- Tahnur, M., Rampisela, D. A., & Rahmadanih, R. (2026). A bibliometric analysis of trends in SAGO product research (2015–2025). *Discover Food*, 6(1), 207. <https://doi.org/10.1007/s44187-026-00953-6>
- Talja, R. A., Helén, H., Roos, Y. H., & Jouppila, K. (2007). Effect of various polyols and polyol contents on physical and mechanical properties of potato starch-based films. *Carbohydrate Polymers*, 67(3), 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.05.019>
- Tan, S. X., Andriyana, A., Ong, H. C., Lim, S., Pang, Y. L., & Ngoh, G. C. (2022). A Comprehensive Review on the Emerging Roles of Nanofillers and Plasticizers towards Sustainable Starch-Based Bioplastic Fabrication. *Polymers*, 14(4), 664. <https://doi.org/10.3390/polym14040664>
- Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11(1), 13900. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>

- Tharanathan, R. N. (2003). Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), 71–78. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(02\)00280-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00280-7)
- Tukenmez Emre, U., Sirin, S., Nigdelioglu Dolanbay, S., & Aslim, B. (2025). Harnessing polysaccharides for sustainable food packaging. *Polymer Bulletin*, 82(8), 2779–2825. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05659-w>
- Vasseghian, Y., Dragoi, E.-N., Almomani, F., & Le, V. T. (2022). Graphene derivatives in bioplastic: A comprehensive review of properties and future perspectives. *Chemosphere*, 286, 131892. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131892>
- Vieira, M. G. A., da Silva, M. A., dos Santos, L. O., & Beppu, M. M. (2011). Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. *European Polymer Journal*, 47(3), 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011>
- Walker, S., & Rothman, R. (2020). Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121158>
- Wang, L., & Tong, L. (2024). Production and Properties of Starch: Current Research. *Molecules*, 29(3), 646. <https://doi.org/10.3390/molecules29030646>
- Wang, S., Zhang, P., Li, Y., Li, J., Li, X., Yang, J., ... Zhang, C. (2023). Recent advances and future challenges of the starch-based bio-composites for engineering applications. *Carbohydrate Polymers*, 307, 120627. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120627>
- Wang, X., Huang, L., Zhang, C., Deng, Y., Xie, P., Liu, L., & Cheng, J. (2020). Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 240, 116292. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116292>
- Xie, Q., Fan, B., Tao, R., Wang, F., & Sun, Y. (2025). A Comprehensive Review of Starch: Structure, Properties, Chemical Modification, and Application in Food Preservation. *Food Frontiers*, 6(4), 1645–1657. <https://doi.org/10.1002/fft.2.70040>
- Yadav, K., & Nikalje, G. C. (2024). Comprehensive analysis of bioplastics: life cycle assessment, waste management, biodiversity impact, and sustainable mitigation strategies. *PeerJ*, 12, e18013. <https://doi.org/10.7717/peerj.18013>
- Yan, X., McClements, D. J., Luo, S., Liu, C., & Ye, J. (2024). Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: Structure, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 340, 122273. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122273>
- Yermagambetova, A. D., Tazhibayeva, S. M., Tyussyupova, B. B., Musabekov, K. B., & Pastorino, L. (2024). Effect of plasticizers on the rheological properties of xanthan gum - starch biodegradable films. *Heliyon*, 10(14), e34550. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34550>

- Zamora Zamora, H. D., Ferreira, H., Pich, A., & Brienzo, M. (2024). Hemicellulose additive to chitosan-based bioplastic improved the tensile strength and allowed to control the material swelling. *Polymer Bulletin*, 81(10), 9265–9285. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05152-w>
- Zamrud, Z., Ng, W. M., & Salleh, H. M. (2021). Effect of bentonite nanoclay filler on the properties of bioplastic based on sago starch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 765(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/765/1/012009>
- Zhang, S., Li, X., Gao, B., & Zhang, S. (2024). Reactive extrusion fabrication of thermoplastic starch with Ca²⁺ heterodentate coordination structure for harvesting multiple-reusable PBAT/TPS films. *Carbohydrate Polymers*, 339, 122240. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122240>
- Zhao, D., Zhang, X., Zhang, Y., Xu, E., Yan, S., Xu, H., & Li, M. (2024). Recent advances in the fabrication, characterization and application of starch-based materials for active food packaging: hydrogels and aerogels. *Sustainable Food Technology*, 2(3), 615–634. <https://doi.org/10.1039/D4FB00030G>
- Zhiguang, C., Haixia, Z., Min, C., Fayong, G., & Jing, L. (2025). The fine structure of starch: a review. *Npj Science of Food*, 9(1), 50. <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00414-x>