

ANALISIS VARIASI KOMPOSISI PLA DENGAN TAMBAHAN PATI KULIT SINGKONG TERHADAP SIFAT UJI TARIK

Aris Al Nur Rachman¹, Dewi Puspitasari², Andita Nataria Fitri Ganda³

^{1,2,3}Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231

E-mail: dewipuspitasari@unesa.ac.id

Abstrak: Penanganan limbah plastik berbasis minyak bumi menjadi tantangan lingkungan global sehingga diperlukan material alternatif yang ramah lingkungan. Salah satu solusi yang dikembangkan adalah bioplastik berbasis *polylactic acid* (PLA) yang dikombinasikan dengan pati kulit singkong sebagai *filler* alami. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi PLA dan pati kulit singkong terhadap sifat mekanik bioplastik, khususnya kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi. Bioplastik disintesis menggunakan metode *injection molding* dengan variasi komposisi pati kulit singkong sebesar 0 wt%, 10 wt%, 20 wt%, dan 30 wt%. Pengujian tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM D638 menggunakan *Universal Testing Machine*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan pati kulit singkong berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik bioplastik. Komposisi 30 wt% pati kulit singkong menghasilkan performa mekanik terbaik dengan kekuatan tarik sebesar 68,5 MPa, modulus elastisitas 4515,15 MPa, dan elongasi sebesar 6,3%. Peningkatan ini mengindikasikan adanya ikatan antar fasa yang lebih baik serta distribusi *filler* yang lebih homogen dalam matriks PLA. Dengan demikian, bioplastik berbasis PLA–pati kulit singkong berpotensi menjadi material alternatif yang kuat, fleksibel, dan lebih ramah lingkungan dibandingkan plastik konvensional.

Kata kunci: Bioplastik, *Polylactic Acid*, Pati Kulit Singkong, Uji Tarik, Sifat Mekanik

Abstract: Plastic waste derived from petroleum-based materials poses serious environmental challenges, driving the development of environmentally friendly alternatives such as bioplastics. One promising approach is the incorporation of natural fillers into polylactic acid (PLA). This study aims to investigate the effect of varying compositions of PLA and cassava peel starch on the mechanical properties of bioplastics, particularly tensile strength, elastic modulus, and elongation. Bioplastics were fabricated using an injection molding process with cassava peel starch contents of 0 wt%, 10 wt%, 20 wt%, and 30 wt%. Tensile testing was conducted according to ASTM D638 standards using a Universal Testing Machine. The results indicate that the addition of cassava peel starch significantly influences the mechanical performance of the bioplastics. The optimal composition was achieved at 30 wt% starch content, exhibiting the highest tensile strength of 68.5 MPa, elastic modulus of 4515.15 MPa, and elongation of 6.3%. These improvements suggest enhanced interfacial bonding and more effective filler dispersion within the PLA matrix. The findings demonstrate that PLA–cassava peel starch bioplastics have strong potential as sustainable materials with improved mechanical performance for broader industrial applications.

Keywords: Bioplastic, *Polylactic Acid*, Cassava Peel Starch, Tensile Properties, Mechanical Behavior.

© 2026, JRM (Jurnal Rekayasa Mesin) dipublikasikan oleh ejournal Teknik Mesin Fakultas Vokasi UNESA.

PENDAHULUAN

Menangani limbah plastik merupakan tantangan yang signifikan. Setiap tahunnya, lebih dari 460 juta metrik ton plastik diproduksi untuk berbagai keperluan. Diperkirakan 20 juta metrik ton limbah plastik dilepaskan ke lingkungan setiap tahun. Proyeksi menunjukkan bahwa angka ini akan meningkat secara signifikan pada tahun 2040 (IUCN, 2025). Plastik tradisional yang berasal dari minyak bumi sulit terurai, dan proses pembuatannya berkontribusi secara signifikan terhadap emisi karbon. Pembakaran sampah plastik melepaskan karbon dioksida bersama dengan gas berbahaya, sementara plastik yang tidak terurai berkontribusi terhadap polusi laut, yang menyebabkan

terbentuknya mikroplastik beracun yang merusak lingkungan laut (Prata et al., 2019; Gutberlet, 2023; Kibria et al., 2023). Kekhawatiran mengenai dampak lingkungan dan emisi karbon yang signifikan mendorong pencarian material alternatif yang lebih ramah lingkungan, salah satunya adalah bioplastik (Naser et al., 2021; Nazari & Aziz, 2020).

Bioplastik adalah jenis plastik yang dapat terurai ketika diuraikan oleh organisme hidup kecil, yang membantu menurunkan jumlah karbon yang dilepaskan ke lingkungan dan dapat mengurangi polusi yang disebabkan oleh plastik biasa secara signifikan (Abe et al., 2021). Salah satu jenis bioplastik yang umum dibuat adalah pati karena mudah ditemukan dan berasal dari sumber yang dapat diperbarui (Sobeih et al., 2025). Di

Indonesia, limbah dari kulit singkong memiliki potensi besar sebagai sumber pati karena negara ini memproduksi singkong dalam jumlah besar untuk tapioka, keripik, dan makanan berbahan dasar singkong lainnya. Pemanfaatan limbah ini membantu menciptakan ekonomi sirkular dan juga dapat menurunkan biaya pembuatan bioplastik (Naomi Nova Mies & Awin Mulyati, 2025).

Namun, bioplastik yang terbuat dari pati alami seringkali rapuh, menyerap banyak kelembapan, dan tidak tahan lama saat terpapar panas (Jiya et al., 2024). Di sisi lain, *Polylactic Acid* (PLA) adalah polimer yang terbuat dari tumbuhan. PLA umum digunakan karena mudah terurai di alam, aman bagi tubuh, dan tidak membahayakan manusia. Namun, PLA memiliki beberapa kekurangan, seperti mudah pecah, tidak tahan terhadap kondisi basah, dan lebih mahal daripada pilihan lainnya (Li et al., 2020; Hussain et al., 2024; Wang et al., 2021). Penggunaan pati kulit singkong bersama dengan PLA dapat membantu meningkatkan kekuatan material sekaligus mempercepat penguraiannya di lingkungan, tanpa mengurangi kualitas baik dari PLA (Shao et al., 2022; Shafqat et al., 2021).

Sejumlah penelitian tentang bioplastik kulit singkong telah banyak di kembangkan Seperti, penelitian Martinaud et al., (2024) menunjukkan pemanfaatan limbah kulit singkong sebagai bahan baku dalam plastik terdegradasi PHA yang dicampur dengan PCL dengan ketahanan termal baik, tetapi sifat tariknya rendah. Picar et al., (2025) serta Kusumawati et al., (2025) menggunakan bioplastik berbasis limbah pati singkong dengan penambahan kitosan menghasilkan kekuatan tarik sekitar 2 MPa yang belum bisa menyaingi rata-rata sifat mekanik PLA yang dapat mencapai >50 MPa. Sejauh ini, penelitian sebelumnya belum meneliti secara mendalam bagaimana berbagai campuran PLA dan pati memengaruhi sifat mekanik terbaik dan kemampuan biodegradasi yang baik. Namun, komposisi material ini memengaruhi hal-hal seperti bagaimana pati meleleh, seberapa baik pengisi menyebar, bagaimana bagian polimer berinteraksi satu sama lain, dan seberapa terstruktur material tersebut, yang semuanya berperan dalam seberapa kuat dan seberapa cepat material tersebut terurai (Sobeih et al., 2025).

Studi ini meneliti bagaimana perubahan campuran PLA dan tepung kulit singkong memengaruhi kekuatan dan seberapa cepat bioplastik baru tersebut terurai. Tujuannya adalah untuk menciptakan material yang kuat dan fleksibel, tetapi juga cepat terurai di alam. Hal ini akan menjadikannya alternatif yang baik untuk plastik biasa, karena lebih ramah lingkungan tetapi tetap berfungsi dengan baik. Hasil penelitian ini dapat membantu dalam pembuatan bioplastik yang lebih mudah digunakan di pabrik-pabrik besar.

METODE

A. Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini, bahan yang digunakan adalah *polylactic acid* (PLA) (Toko lokal di Surabaya, Indonesia). Bahan PLA yang dipakai berbentuk butiran dengan diameter antara 2 hingga 5 mm. PLA memiliki kerapatan berkisar antara 1,25 hingga 1,43 g/cm³, dan titik lebur antara 175 hingga 210 °C. Pati kulit singkong (Bandung, Indonesia) dengan ukuran partikel 80 mesh, berwarna putih kecokelatan dan memiliki titik lebur 169,2°C serta suhu gelatinisasi antara 66 hingga 74°C.

B. Proses Sintesis Material

1. Sintesis Kulit Singkong

Pati direndam dan diblender dalam rasio air sekitar 1:3 hingga membentuk suspensi halus, Endapan pati dibiarkan mengendap selama 12–24 jam, diberi waktu cukup agar lapisan supernatan jelas terpisah, lalu supernatan dibuang dan endapan dikeringkan dalam oven pada suhu 60–70 °C selama 6–13 jam . Setelah kering, pati digiling ulang dan diayak (mesh 100–350) untuk memperoleh bubuk halus siap pakai, biasanya dengan rendemen antara 5–20 %, warna putih kekuningan, kadar pati sekitar 68–75 %, kadar amilosa 27 %, dan kadar air 11–25 % (Oliver, 2019; Wahyuningtyas et al., 2019). Pati kulit singkong ditimbang dan dipersiapkan untuk digunakan pada proses sintesis bioplastik.



Gambar 1. Proses Sintesis Kulit Singkong (dokumentasi pribadi)

2. Sintesis Bioplastik

Hasil ekstraksi dilihat pada Tabel 1 sebanyak (0g, 10g, 20g, 30g) dicampurkan dengan PLA (100g, 90g, 80g, 70g). Kemudian campuran diaduk secara perlahan di mesin *injection molding* sampai tidak ada gumpalan dan gelembung yang terlihat. Dan untuk suhu proses sebesar 200°C dengan tekanan sebesar 5-6 bar. Proses ini bertujuan untuk mempermudah proses pencampuran dan supaya serbuk kulit singkong menempel secara sempurna pada PLA *granule*. Setelah itu campuran dituang dan dicetak.

Tabel 1. Ekstraksi Kulit Singkong dan PLA

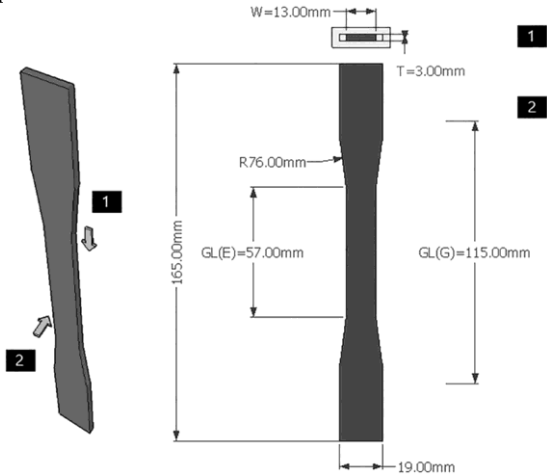
Sampel	Pati Kulit Singkong (wt%)	Polylactic Acid (wt%)
PLA Murni	0	100
Bioplastik 1	10	90
Bioplastik 2	20	80
Bioplastik 3	30	70

C. Metode karakterisasi

1. Uji Tarik

Sampel bioplastik dicetak dalam bentuk batang uji standar Tipe I ASTM D638, dengan dimensi ±115 mm panjang, 19 mm lebar, dan ketebalan sekitar 4 mm, yang dirancang khusus untuk pengujian material polimer berdimensi tipis (ZwickRoell, 2025). Setelah proses pencetakan selesai, sampel dikondisikan terlebih

dahulu pada suhu ruang selama 24 jam guna memastikan kestabilan termal dan kelembapan. Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kecepatan penarikan konstan 5 mm/menit. Untuk menjamin keandalan data, setiap variasi komposisi diuji sebanyak tiga kali, sehingga hasil yang diperoleh bersifat valid dan representatif terhadap sifat mekanik masing-masing formulasi bioplastik. Ilustrasi detail spesimen uji dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. ASTM D638 Tipe I (Sumber: ZwickRoell. 2025)

D. Analisis Data

Pendekatan kuantitatif diterapkan melalui eksperimen laboratorium untuk menguji pengaruh variasi komposisi PLA terhadap kekuatan tarik. Hasil eksperimen kemudian dianalisis secara numerik untuk mengidentifikasi pola dan perbedaan antarperlakuan. Penyajian data yang diperoleh dalam bentuk visual seperti tabel, dan grafik guna memudahkan pemahaman dan interpretasi data. Seluruh data hasil pengujian diolah menggunakan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel dan OriginLab untuk menghasilkan grafik perbandingan serta menghitung nilai teoritis yang relevan. Perbandingan antara hasil eksperimen dan analisis teoritis tersebut memberikan dasar evaluasi terhadap efektivitas formulasi bioplastik yang diuji. Pendekatan ini dinilai mampu memberikan analisis yang lebih menyeluruh dan mendalam dalam menilai kinerja dan kelayakan bioplastik yang dikembangkan

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Tarik

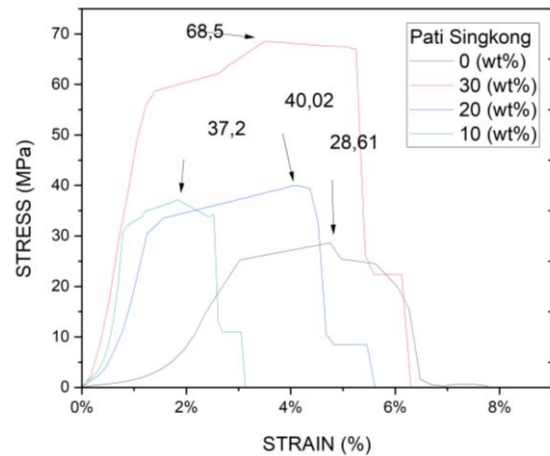
Pengujian ini dilakukan dengan memberikan gaya secara bertahap dan konstan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) hingga spesimen mengalami putus. Selama proses ini, data seperti kekuatan tarik maksimum, *yield strenght*, *yield point*, elongasi, dan modulus elastisitas dapat diperoleh untuk menilai performa mekanik material. Dalam penelitian ini, bioplastik yang dibuat dari campuran PLA dan pati kulit singkong menunjukkan variasi kekuatan tarik tergantung pada proporsi masing-masing bahan.

Tabel 2

Hasil perhitungan rata-rata sampel bioplastik

Tensile Strength				
Komposisi Pati/PLA	Sampel 1 (MPa)	Sampel 2 (MPa)	Sampel 3 (MPa)	Rata-rata (MPa)
0/100	28.61	29.20	27.97	28.59
10/90	37.89	36.77	37.20	37.28
20/80	39.53	41.24	40.02	40.26
30/70	67.98	68.50	69.03	68.50

Setiap sampel di uji sebanyak 3 kali pengujian selanjutnya di ambil rata-rata dari ketiga sampel. Setelahnya grafik uji, diambil pendekatan rata-rata sampel yang telah di uji. Hasil yang di dapatkan adalah rata-rata tertinggi pada sampel 30 (wt%) pati dengan rata-rata *tensile strenght* 67,83 MPa hal ini dikarenakan penambahan *filler* penguat yang mampu meningkatkan resistensi deformasi, dan berbanding terbalik dengan komposisi pati 0 (wt%) dikarenakan bioplastik dari PLA asli cenderung rapuh (Yu, 2020). Kemudian grafik dibandingkan dengan masing-masing sampel yang dapat di lihat tegangan-regangannya pada Gambar 3.

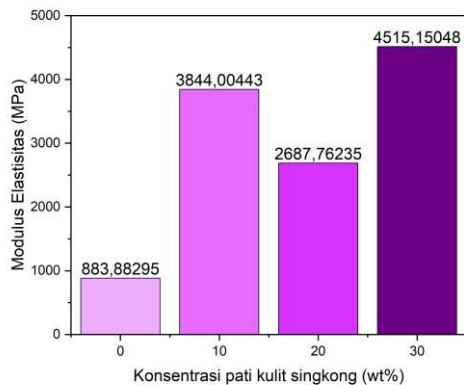


Gambar 3. Grafik tegangan-regangan bioplastik pati kulit singkong-PLA

Berdasarkan Gambar 3 hubungan antara *strain* (%) dan *strenght* (MPa) pada bioplastik berbasis PLA dengan variasi penambahan pati kulit singkong sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30% (wt%), diperoleh hasil yang menunjukkan adanya pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik bioplastik. Sampel dengan komposisi PLA murni 0% menunjukkan kekuatan tarik sebesar 26,23 MP *strain* maksimum sekitar 7,78%, menandakan bahwa PLA murni memiliki ketahanan tarik paling rendah namun elastisitas paling baik dibandingkan bioplastik lainnya. Alasan utama PLA murni memiliki ketahanan tarik rendah tetapi elastisitas tinggi adalah karena struktur polimernya yang homogen dan kristalinitas tinggi, yang membuatnya rapuh namun tetap mampu mengalami deformasi plastis lebih baik dibandingkan bioplastik berbasis pati atau komposit.

Penambahan 10% dan 20% pati kulit singkong menunjukkan nilai kekuatan tarik masing-masing sebesar 37,2 MPa dan 40,02 MPa, yang cukup tinggi tetapi terjadi penurunan pada nilai *strain* dibandingkan PLA murni diduga akibat distribusi *filler* yang kurang merata yang menyebabkan *filler* menumpuk disebagian tempat (Serra-parareda et al., 2022). Pada penambahan 30% pati kulit singkong, kekuatan tarik mengalami

kenaikan cukup drastis 68,5 MPa, disertai dengan kenaikan *strain* sebesar 6,3%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *filler* alami hingga 30% masih mampu mempertahankan kekuatan tarik material tanpa mengorbankan elastisitas materia (Yu, 2020). Studi internasional oleh Şen & Sever, (2025) juga menegaskan bahwa penggunaan pati kulit singkong dalam komposit PLA memengaruhi nilai *tensile strenght* secara signifikan tergantung pada proporsi campurannya.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas komposisi pati kulit singkong-PLA

Hasil pengujian modulus elastisitas bioplastik menunjukkan bahwa penambahan pati kulit singkong sebagai *filler* dalam matriks PLA memberikan pengaruh signifikan terhadap kekakuan material. Pada komposisi PLA murni, modulus elastisitas tercatat sebesar 883,88 MPa nilai ini merupakan yang paling rendah karena tidak adanya partikel penguat yang mampu meningkatkan resistensi terhadap deformasi. Peningkatan drastis terjadi pada penambahan 10 wt% kulit singkong, yaitu mencapai 3844 MPa, yang menunjukkan bahwa *filler* dalam jumlah moderat mampu memperkuat ikatan antar molekul serta meningkatkan kekakuan material. Penurunan terjadi pada 20 wt%, yaitu sebesar 2687,76 MPa, diduga akibat distribusi *filler* yang tidak homogen serta aglomerasi partikel, yang menyebabkan penurunan kemampuan material dalam mentransfer tegangan (Serra-parareda et al., 2022).

Namun, pada konsentrasi 30 wt%, nilai modulus meningkat kembali secara signifikan hingga 4515,15 MPa. Kenaikan ini mengindikasikan bahwa pada titik tertentu, struktur material menjadi lebih padat dan ikatan antara matriks PLA dan partikel serat kulit singkong terbentuk lebih kuat (Mekonnen, 2022).

Selain itu elongasi juga digunakan untuk menentukan kemampuan suatu material untuk meregang atau memanjang sebelum putus atau gagal. Elongasi adalah ukuran perubahan panjang suatu material ketika diberikan gaya tarik, biasanya dinyatakan dalam persentase perubahan panjang asli (Hu et al., 2020).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa komposisi material berpengaruh terhadap performa bioplastik yang dihasilkan. Penambahan *filler* kulit singkong mampu meningkatkan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dibandingkan PLA murni. Komposisi 30 wt% *filler* menunjukkan performa mekanik tertinggi dengan kekuatan tarik mencapai 68,5 MPa, modulus elastisitas sebesar 4515,15 MPa, serta elongasi yang masih cukup baik yaitu 6,3% serta *yield strenght* 58,96 MPa, *yield point* 58,7 MPa, dengan *tradeline* 0,98. Hal ini mengindikasikan bahwa pada proporsi tersebut terjadi peningkatan ikatan antar fasa dan distribusi *filler* yang lebih efektif.

REFERENSI

- [1.] (IUCN), I. U. for C. of N. (2025). *Plastic Pollution: IUCN Issues Brief*. IUCN. <https://iucn.org/resources/issues-brief/plastic-pollution>
- [2.] Abe, M. M., Martins, J. R., Sanvezzo, P. B., Macedo, J. V., Branciforti, M. C., Halley, P., Botaro, V. R., & Brienza, M. (2021). Advantages and disadvantages of bioplastics production from starch and lignocellulosic components. *Polymers*, *13*(15). <https://doi.org/10.3390/polym13152484>
- [3.] Gutberlet, J. (2023). Global Plastic Pollution and Informal Waste Pickers. *Cambridge Prisms: Plastics*, 1–38. <https://doi.org/10.1017/plc.2023.10>
- [4.] Hu, H., Xu, A., Zhang, D., Zhou, W., Peng, S., & Zhao, X. (2020). *High-Toughness Poly(lactic Acid) / Starch Blends Prepared through Reactive Blending Plasticization and Compatibilization*.
- [5.] Hussain, M., Khan, S. M., Shafiq, M., & Abbas, N. (2024). A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications. *Giant*, *18*. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100261>
- [6.] Jiya, J. Y., Mu'azu Abubakar, Adekunle Joseph, I., C. Egwim, E., & Obanimomo, K. (2024). Thermal Stability, Transparency, and Water Sensitivity Properties of Bleached, Cross-Linked Cassava Starch Film. *Journal of Digital Food, Energy & Water Systems*, *5*(1), 34–44. <https://doi.org/10.36615/y8wwtj89>
- [7.] Kibria, M. G., Masuk, N. I., Safayet, R., Nguyen, H. Q., & Mourshed, M. (2023). Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management. In *International Journal of Environmental Research* (Vol. 17, Issue 1). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00507-z>
- [8.] Kusumawati, R., Syamdid, Abdullah, A. H. D., Nissa, R. C., Firdiana, B., Handayani, R., Munifah, I., Dewi, F. R., Basmal, J., & Wibowo, S. (2025). Physical Properties of Biodegradable Chitosan-

- Cassava Starch Based Bioplastic Film Mechanics. *Science and Technology Indonesia*, 10(1), 191–200. <https://doi.org/10.26554/sti.2025.10.1.191-200>
- [9.] Li, G., Zhao, M., Xu, F., Yang, B., Li, X., Meng, X., Teng, L., Sun, F., & Li, Y. (2020). Synthesis and Biological Application of Polylactic Acid. *Molecules*, 25(21). <https://doi.org/10.3390/molecules25215023>
- [10.] Martinaud, E., Hierro-Iglesias, C., Hammerton, J., Hadad, B., Evans, R., Sacharczuk, J., Lester, D., Derry, M. J., Topham, P. D., & Fernandez-Castane, A. (2024). Valorising Cassava Peel Waste Into Plasticized Polyhydroxyalkanoates Blended with Polycaprolactone with Controllable Thermal and Mechanical Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(8), 3503–3515. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03167-4>
- [11.] Mekonnen, T. H. (2022). *Materials Advances as a compatibilizer †*. 6208–6221. <https://doi.org/10.1039/d2ma00501h>
- [12.] Naomi Nova Mies, & Awin Mulyati. (2025). Pemanfaatan Limbah Kulit Singkong Sebagai Plastik Ramah Lingkungan Untuk Mengatasi Pencemaran Akibat Plastik Polimer. *Student Research Journal*, 3(1), 26–36. <https://doi.org/10.55606/srj-yappi.v3i1.1684>
- [13.] Naser, A. Z., Deiab, I., & Darras, B. M. (2021). Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review. *RSC Advances*, 11(28), 17151–17196. <https://doi.org/10.1039/d1ra02390j>
- [14.] Nazari, W. A. A. W., & Aziz, A. A. (2020). International Journal of Applied Science and Engineering Review. *International Journal of Applied Science and Engineering Review*, 1(6), 1–5.
- [15.] Oliver, J. (2019). Pembuatan Bioplastik dari Pati Kulit Singkong (Manihot esculenta) Berpengisi Mikrokristalin Selulosa AvicelPH-101 (Wood pulp) dengan Plastisizer Sorbitol. *Hilos Tensados*, 1.
- [16.] Picar, A. E., Molina, B. I., Dejuras, J. F., Veran, M. J., & Estrellado, J. R. (2025). Valorization of Cassava Peel and Shrimp Shell Waste for Bioplastic Film Development: Extraction, Characterization, and Response Modeling. *International Journal of Multidisciplinary: Applied Business and Education Research*, 6(6), 3018–3044. <https://doi.org/10.11594/ijmaber.06.06.30>
- [17.] Prata, J. C., Patr, A. L., Mouneyrac, C., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-santos, T. (2019). Solutions and Integrated Strategies for the Control and Mitigation of Plastic and Microplastic Pollution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2411), 1–19.
- [18.] Şen, İ., & Sever, K. (2025). Production and characterization of agricultural waste natural fiber-filled polylactic acid composites. *Polymer Bulletin*, 82(9), 4051–4074. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05698-3>
- [19.] Serra-parareda, F., Delgado-aguilar, M., Espinach, F. X., & Mutj, P. (2022). *Sustainable plastic composites by polylactic acid-starch blends and bleached kraft hardwood fibers*. 238(August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109901>
- [20.] Shafqat, A., Al-Zaqri, N., Tahir, A., & Alsalmeh, A. (2021). Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(3), 1739–1749. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.015>
- [21.] Shao, L., Xi, Y., & Weng, Y. (2022). Recent Advances in PLA-Based Antibacterial Food Packaging and Its Applications. *Molecules*, 27(18). <https://doi.org/10.3390/molecules27185953>
- [22.] 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), 1–32. <https://doi.org/10.3390/ma18081762>
- [23.] Wahyuningtyas, D., Dwi Sukmawati, P., Muthia, D. N., & Fitria, A. (2019). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Optimasi Pembuatan Plastik Biodegradable dari Pati Kulit Singkong dengan Penambahan Asam Sitrat Sebagai Crosslinking Agent*. April, 1–8.
- [24.] Wang, S., Shen, Q., Guo, C., & Guo, H. (2021). Comparative study on water vapour resistance of poly(Lactic acid) films prepared by blending, filling and surface deposit. *Membranes*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/membranes11120915>
- [25.] Yu, M. (2020). *RSC Advances polylactic acid (PLA) composite materials*. 26298–26307. <https://doi.org/10.1039/d0ra00274g>
- [26.] ZwickRoell. (2025). *ASTM D638: sifat tarik plastik | ZwickRoell*. ZwickRoell. <https://www.zwickroell.com/id/industri/plastik/b>

ahan-cetakan-termoplastik-dan-
termosetting/sifat-tarik-astm-d638/