

Karakterisasi Bioplastik Berbasis Pati Singkong, Jagung, dan Biji Nangka dengan *Filler* Cangkang Telur dan *Zinc Oxide*

Amelia Naomi Agustina¹, Denny Hendrik Nainggolan², Jonathan Ernest Sirait³,
Maghfira Arum Lestari⁴

^{1,3,4}Teknologi Proses Industri Petrokimia, Politeknik Industri Petrokimia Banten, Indonesia,

²Industri Pertahanan, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan, Indonesia

¹ amelia.naomi@poltek-petrokimia.ac.id, ² joernest.workmail@gmail.com, ³ denny@poltek-petrokimia.ac.id,
⁴ maghfira.arum@poltek-petrokimia.ac.id

Abstrak

Pengembangan bioplastik berbasis pati menjadi strategi inovatif dalam diversifikasi produk petrokimia menuju material berbasis hayati sekaligus menekan akumulasi limbah plastik di lingkungan. Selain itu, pengembangan ini mendukung pemanfaatan limbah agroindustri secara berkelanjutan. Namun, bioplastik pati masih memiliki keterbatasan pada sifat mekanik dan ketahanan air. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh jenis pati dan *filler* terhadap sifat fisik, mekanik, *swelling capacity*, dan biodegradabilitas untuk memperoleh formulasi terbaik. Sintesis dilakukan dengan metode pencampuran dan gelatinisasi pati dengan penambahan *plasticizer* sorbitol pada variasi pati singkong, jagung, dan biji nangka serta *filler* seng oksida dan cangkang telur pada komposisi tertentu. Kemudian dilakukan karakterisasi dan analisa terhadap bioplastik yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis pati lebih berpengaruh pada kemampuan elongasi, sedangkan jenis *filler* lebih menentukan kuat tarik bioplastik. Semua sampel memenuhi standar kuat tarik plastik *biodegradable* dan terdegradasi dalam 7 hari sesuai SNI 7818:2014. Namun, matriks yang memenuhi kriteria elongasi yaitu bioplastik dengan kombinasi pati singkong tanpa *filler* dan dengan ZnO. Formulasi terbaik yaitu kombinasi pati singkong dengan *filler* ZnO yaitu kuat tarik sebesar 3,69 MPa, elongasi saat putus s27,50%, kapasitas *swelling* sebesar 59,02%, dan dapat terdegradasi dalam 7 hari.

Article History:

Received 25 Feb 2026

Revised 17 Juny 2026

Accepted 20 July 2026

Available online 10 Aug 2026

Kata Kunci : bioplastik, biodegradasi, biji nangka, *filler*, pati

Abstract

The development of starch-based bioplastics is an innovative strategy in diversifying petrochemical products toward bio-based materials while reducing the accumulation of plastic waste in the environment. Furthermore, the development supports sustainable utilization of agro-industrial waste. However, starch-based bioplastics still have limitations in terms of mechanical properties and water resistance. This study evaluates the effects of starch type and filler on the physical, mechanical, swelling capacity, and biodegradability properties to obtain the optimal formulation. The synthesis was carried out by mixing and gelatinizing starch with the addition of sorbitol as plasticizer employing cassava, corn, and jackfruit seeds starches, as well as zinc oxide and eggshell as filler at certain compositions. The resulting bioplastics were characterized and analyzed. The results showed that starch type had a greater influence on elongation while filler type was more dominant in determining the tensile strength. All samples met the standard of tensile strength and degraded within 7 days according to SNI 7818:2014. However, only cassava starch-based without filler and with ZnO met the elongation criteria. The best formulation, was cassava starch with ZnO filler, with a tensile strength of 3,69 MPa, elongation at break of 27,50%, swelling capacity of 59,02%, and able to degrade within 7 days.

Keywords : bioplastic, biodegradation, jackfruit seeds, filler, starch

1. Pendahuluan

Penggunaan plastik konvensional berbasis petrokimia terus meningkat seiring dengan perkembangan industri dan kebutuhan masyarakat modern. Plastik berbasis minyak bumi umumnya ringan, kuat, tahan air, dan murah sehingga dibutuhkan dalam berbagai aplikasi salah satunya sebagai kemasan. Namun, plastik konvensional sulit terurai secara alami dan berkontribusi terhadap penumpukan sampah plastik. Dikarenakan plastik sulit terurai secara alami, pemusnahan sampah plastik sering diupayakan dengan insinerasi yang dapat menghasilkan gas beracun seperti dioxin, furan, dan merkuri yang bersifat beracun sehingga berbahaya jika terlepas ke udara bebas. Baik penumpukan sampah plastik dan pelepasan gas beracun akibat insinerasi merupakan masalah bagi lingkungan.

Di sisi lain, limbah pangan juga merupakan masalah signifikan karena mencemari lingkungan. Berdasarkan data pada Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional, komposisi sampah berdasarkan jenis sampah yaitu 39,6% berasal dari sisa makanan dan 20,04% berasal dari plastik (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2025). Hal ini menunjukkan bahwa lebih dari 50% sampah nasional disebabkan oleh limbah pangan dan plastik. Umumnya 90% limbah pangan bersifat mudah terurai sehingga laju *reuse* dan *recycle* dari limbah pangan masih cukup rendah (Kasmuri & Zait, 2018). Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi persoalan sampah plastik konvensional yang sulit terurai, limbah pangan yang masih jarang digunakan kembali (*reuse*) maupun di *recycle*, dan sekaligus pemanfaatan limbah pangan yaitu dengan pengembangan bioplastik yang juga dapat menjadi peluang diversifikasi produk plastik ke arah yang lebih berkelanjutan.

Pengembangan bioplastik dengan menggunakan limbah pangan seperti biji buah dan cangkang telur tidak hanya menjadi solusi terhadap persoalan limbah plastik, namun juga mendukung implementasi kebijakan global termasuk *Sustainable Development Goals* (SDGs) khususnya SDG 12 yaitu *Responsible Consumption and Production* melalui optimalisasi pemanfaatan sumber daya hayati terbarukan serta pengurangan ketergantungan terhadap plastik berbasis petrokimia. Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Lingkungan Hidup telah mengeluarkan kebijakan yang tertuang pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.75 Tahun 2019 tentang peta jalan pengurangan sampah oleh produsen yang menargetkan pengurangan sampah plastik sebesar 30% di tahun 2029 dan diperkuat dengan pembatasan penggunaan plastik sekali pakai di beberapa provinsi dan kota besar di Indonesia. Sejalan dengan kebijakan global dan nasional, pengembangan material ramah lingkungan seperti bioplastik dapat menjadi salah satu strategi untuk mendukung implementasi kebijakan yang ada.

Bioplastik adalah material polimerik yang diperoleh secara keseluruhan atau sebagian dari bahan baku terbarukan seperti pati, selulosa, minyak yang berasal dari tumbuhan, atau biomassa mikroba (Puca-Pacheco et al., 2025). Beberapa sumber pati yang mudah didapatkan di Indonesia yaitu pati singkong, jagung, dan biji nangka berpotensi sebagai matriks bioplastik. Penelitian terdahulu telah menggunakan pati singkong (Dewi et al., 2023; Rafid et al., 2021; Rahma et al., 2025), jagung (Sari et al., 2025; Zakaria et al., 2024), dan biji nangka (Lestari et al., 2020; Maulida et al., 2018; Nguyen et al., 2022; Purbasari et al., 2014) (Maulida et al., 2018) sebagai sumber pati dalam pembuatan bioplastik maupun film. Sebagian besar penelitian berfokus pada salah satu jenis pati dengan variasi konsentrasi *filler* maupun *plasticizer* atau satu jenis *filler* dan *plasticizer* dengan satu jenis pati sehingga pengaruh kombinasi berbagai jenis pati dan jenis *filler* terhadap karakteristik bioplastik belum dipelajari secara komprehensif.

Pati merupakan polimer polisakarida yang mudah terurai secara hayati dan banyak digunakan dalam aplikasi kemasan pangan dikarenakan ketersediaannya melimpah, harga yang rendah, dan keamanan untuk pangan (Jiang et al., 2020). Pati terdiri dari molekul amilosa dan amilopektin. Baik amilosa maupun amilopektin dapat berpengaruh pada kristalisasi pati yang dapat mempengaruhi respon mekanik dari produk berbasis pati. Kandungan amilosa yang tinggi dapat meningkatkan kekakuan, kapasitas pengikatan air, dan resistansi terhadap kepatahan. Namun di sisi lain dapat menurunkan elastisitas dan permeabilitas oksigen (Cano et al., 2014). Penelitian yang dilakukan oleh Yustianto et al. (2024) menggunakan beberapa jenis pati yaitu pati biji alpukat, kulit pisang, biji mangga, biji singkong dan mengkombinasikan dengan beberapa jenis *plasticizer* yaitu gliserol, sorbitol dan polivinil alkohol (PVA) dengan variasi konsentrasi bahan tambahan *beeswax*. Dari hasil penelitian tersebut, jenis pati dan jenis *plasticizer* berpengaruh terhadap sifat mekanik dan biodegradabilitas bioplastik yang dihasilkan. Semakin tinggi kandungan pati yang digunakan, nilai

kuat tarik semakin rendah namun elongasi, kemampuan *swelling*, dan resistansi terhadap degradasi semakin meningkat. Sementara itu, pengaruh jenis *plasticizer* pada penelitian ini terlihat bahwa PVA menghasilkan bioplastik dengan nilai kuat tarik dan kemampuan *swelling* yang paling tinggi, namun elongasi dan kemampuan degradasi tertinggi didapat pada bioplastik yang menggunakan gliserol. Penelitian yang dilakukan oleh Yustianto et al. (2024) ini belum mengkaji pengaruh penambahan *filler* untuk meningkatkan karakteristik bioplastik yang dihasilkan dengan jenis pati dan *plasticizer* yang digunakan pada penelitian tersebut.

Bioplastik berbasis pati umumnya memiliki kelemahan pada sifat mekanik dan kurangnya ketahanan terhadap air ditandai dengan persentase *swelling* ditandai dengan persentase *swelling* yang tinggi. Modifikasi formulasi dengan penambahan *filler* dapat meningkatkan karakteristik bioplastik. Selain meningkatkan sifat dari matriks polimer, penambahan *filler* ke dalam komposit polimer dapat menurunkan biaya (Homavand et al., 2024). Beberapa bahan *filler* anorganik seperti cangkang telur dan seng oksida (ZnO) diketahui dapat meningkatkan kekuatan mekanik, stabilitas struktur, serta sifat biodegradabilitas bioplastik. Cangkang telur kaya akan kalsium karbonat (CaCO_3) sehingga dapat bertindak sebagai penguat yang meningkatkan sifat mekanik terutama kuat tarik dan ketahanan sobek serta dengan harga yang lebih rendah (Homavand et al., 2024). Untuk meningkatkan sifat bioplastik yang dihasilkan, penambahan *plasticizer* juga dapat meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas dari bioplastik (Yustianto et al., 2024). *Plasticizer* yang banyak digunakan pada plastik berbasis pati yaitu gliserol dan sorbitol (Mu & Laurindo, 2008). Studi yang dilakukan oleh Gurgel et al. (2011) menunjukkan bahwa film yang mengandung gliserol sebagai *plasticizer* menyerap air dengan laju yang lebih cepat dibandingkan film yang menggunakan sorbitol. Temuan serupa juga didapatkan oleh Cheng et al. (2006) yang membuat *edible film* dari Konjac Glucomannan dimana kombinasi formulasi dengan gliserol lebih sensitif terhadap kelembaban dibanding yang menggunakan sorbitol sebagai *plasticizer*. Selain itu, film Konjac Glucomannan dengan menggunakan sorbitol menghasilkan film yang lebih kuat dibandingkan film yang menggunakan gliserol. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan sorbitol sebagai *plasticizer* dalam formulasi bioplastik yang dibuat agar sifat bioplastik yang dihasilkan lebih tahan terhadap kelembaban namun tetap memiliki kuat mekanik yang lebih tinggi.

Kajian mengenai kombinasi berbagai jenis pati dan *filler* diperlukan karena setiap bahan memiliki karakteristik fisikokimia yang berbeda sehingga sifat akhir bioplastik dapat menjadi berbeda pula. Studi komparatif yang mengevaluasi pengaruh variasi beberapa kombinasi bahan baku bioplastik terhadap pencapaian karakteristik fisik mekanik, kemampuan *swelling*, dan biodegradabilitas bioplastik komersial masih terbatas. Berbagai penelitian telah melaporkan penggunaan *plasticizer* sorbitol, *filler* cangkang telur, maupun *filler* ZnO secara terpisah dalam formulasi berbagai bioplastik berbasis pati, namun kajian yang mengombinasikan ketiga komponen tersebut pada pati singkong, jagung, dan biji nangka belum dilakukan. Dengan pendekatan komparatif dari masing-masing jenis bahan baku bioplastik, penelitian ini diharapkan memperoleh hubungan antar karakteristik bahan penyusun khususnya jenis pati yaitu pati singkong, pati biji nangka, dan pati jagung serta jenis *filler* cangkang telur dan ZnO pada kondisi formulasi yang sama dengan sifat akhir bioplastik sehingga didapat formulasi yang terbaik dan dapat mendekati standar bioplastik komersial.

2. Bahan dan Metode

Bahan yang digunakan adalah sumber pati yang berasal dari singkong (dari tanaman asal *Manihot utilissima*, *pharmaceutical grade*, kemurnian >99%), pati jagung (kemurnian 100%, *brand* Mama Suka), biji nangka, *filler* yang terdiri dari limbah cangkang telur ayam dan ZnO p.a (Smart Lab, 99%), pelarut air suling, dan *plasticizer* yaitu sorbitol cair *food grade*. Cangkang telur murni tersusun atas 98,34% kalsium karbonat, 0,84% magnesium karbonat, dan 0,75% kalsium fosfat (Nurhasanah et al., 2023). Limbah biji nangka dan cangkang telur ayam diperoleh dari dapur usaha catering di Kota Semarang. Alat yang digunakan *hotplate* dan *magnetic stirrer*, termometer air raksa, termometer ruang digital, *soil meter*, *beaker glass*, baskom, blender, neraca analitik, papan cetakan akrilik berukuran 20 x 20 cm.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis pati yaitu pati singkong, pati biji nangka, dan pati jagung serta jenis *filler* yaitu cangkang telur ayam dan ZnO. Tabel 1 menampilkan kadar amilosa dan amilopektin pada masing – masing sumber pati yang digunakan.

Tabel 1. Kadar Amilosa dan Amilopektin Beberapa Sumber Pati

Jenis Pati	Kadar Amilosa (%)	Kadar Amilopektin (%)	Referensi
Pati singkong	17	87	(Dewi et al., 2023)
Pati jagung	24 – 26	74 – 76	(Nofrida et al., 2024)
Pati biji nangka	26	74	(Aliyatunnaim et al., 2013)

Sementara itu, variabel kontrol dalam penelitian ini adalah kuantitas formula campuran dan jenis *plasticizer* yang digunakan yaitu sorbitol. Tabel 2 menampilkan rancangan variabel yang dilakukan dalam proses pembuatan bioplastik.

Tabel 2. Variabel bebas pada penelitian

Kode Sampel	Jenis Pati	Jenis <i>Filler</i>
T1	Pati singkong	Tanpa <i>filler</i>
T2	Pati singkong	Cangkang telur
T3	Pati singkong	Seng oksida (ZnO)
T4	Pati jagung	Tanpa <i>filler</i>
T5	Pati jagung	Cangkang telur
T6	Pati jagung	Seng oksida (ZnO)
T7	Pati biji nangka	Tanpa <i>filler</i>
T8	Pati biji nangka	Cangkang telur
T9	Pati biji nangka	Seng oksida (ZnO)

Tahap awal dilakukan persiapan pati biji nangka sebagaimana yang dilakukan oleh Purbasari et al. (2014). Biji nangka dibersihkan dan dihilangkan dari kulit arinya. Setelah itu, biji nangka dicampurkan dengan air dan dihancurkan menggunakan blender. Selanjutnya campuran disaring dengan menggunakan saringan 200 mesh hingga terpisah antara ampas dan cairan pati. Cairan pati kemudian dicuci dengan air suling dan kemudian dibiarkan hingga pati mengendap. Endapan pati kemudian dipisahkan dari air suling dengan corong pemisah dan selanjutnya pati basah dikeringkan dengan dijemur dibawah sinar matahari selama 1 – 2 hari untuk mengurangi konsentrasi air dalam pati. Cangkang telur disiapkan dengan metode seperti yang dilakukan oleh Rahma et al. (2025) yaitu dilakukan pencucian dengan air dan dikeringkan selama 2 – 3 hari. Kemudian cangkang telur dihancurkan dan dihaluskan menggunakan blender hingga diperoleh granul halus cangkang telur.

Sintesis bioplastik dilakukan dengan prosedur seperti yang dilakukan oleh Sari et al. (2025) dengan cara *plasticizer* sorbitol sebanyak 1,5 gram dimasukkan ke dalam *beaker glass* yang berisi air suling sebanyak 50 gram. Kemudian, campuran diaduk hingga homogen menggunakan *magnetic stirrer*. Pati sebanyak 5 gram lalu dimasukkan ke dalam campuran sorbitol dan air suling tersebut. Selanjutnya, *filler* sebanyak 0,5 gram dimasukkan ke dalam campuran dan diaduk kembali hingga homogen. Campuran kemudian dipanaskan selama 50 menit pada suhu 80 – 85 °C secara kontinu menggunakan *hotplate*. Setelah itu larutan dicetak menggunakan papan cetakan akrilik berukuran 20 x 20 cm dan dikeringkan pada suhu kamar hingga bioplastik dapat dilepaskan dari cetakan.

Selanjutnya bioplastik yang diperoleh dianalisa karakteristik kuat tarik, elongasi, kemampuan *swelling*, dan biodegradabilitas. Uji kuat mekanik dilakukan dengan menggunakan alat Brookfield CT3 di Unit Pelaksana Teknis (UPT) Laboratorium Terpadu di Universitas Diponegoro. Sementara itu, uji biodegradabilitas dan *swelling test* dilakukan di Laboratorium Dasar di Politeknik Industri Petrokimia Banten.

Uji kapasitas *swelling* dilakukan dengan memotong sampel bioplastik hingga berukuran 2 x 2 cm. Lalu potongan bioplastik ditimbang di neraca analitik hingga didapat massa awal (w_0). Kemudian, *beaker glass* yang berisi 15 ml air suling dimasukkan sampel yang telah ditimbang sebelumnya dan potongan bioplastik direndam selama 30 detik karena sampel akan mulai larut jika direndam lebih lama. Setelah 30 detik, sampel dikeluarkan secara perlahan dan dikeringkan dengan kertas saring atau *tissue* agar sampel tidak hancur. Lalu sampel kembali ditimbang untuk mendapatkan berat akhir setelah perendaman (w_1). Uji kapasitas *swelling* dilakukan sebanyak tiga kali replikasi. Kapasitas serap air (*swelling capacity*) dihitung dengan persamaan berikut.

$$SC (\%) = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \times 100$$

Uji biodegradabilitas dilakukan dengan *soil burial test* yaitu tanah diisi ke dalam kotak *thinwall* berukuran 1000 ml. Tanah yang digunakan merupakan tanah gembur berwarna coklat tua yang digunakan untuk pertanian. Sebelum dilakukan pengujian, tanah diukur lebih dahulu pH nya dengan

menggunakan *soil meter*. Sementara itu temperatur dan kelembaban ruang diukur dengan menggunakan termometer ruangan digital. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah subur yang digunakan untuk pertanian dengan pH cenderung netral (7 – 8) dan intensitas cahaya matahari menengah karena diletakkan dalam ruangan. Rata – rata suhu ruangan berkisar antara suhu 29 – 31°C dan kelembaban berkisar 60 – 75% pada rentang waktu pengamatan. Kemudian, sampel bioplastik berukuran 2 x 2 cm ditimbang untuk menentukan berat awal (w_0) sebelum dikubur di tanah dengan kedalaman yang sama yaitu 2,5 cm dari bagian bawah wadah dan 2,5 cm dari bagian atas sehingga ketinggian tanah pada semua wadah *thinwall* sama. Kemudian, wadah plastik *thinwall* yang telah berisi tanah dan sampel ini disimpan pada suhu ruangan yaitu di lingkungan atmosfer tanpa sinar matahari langsung dan terhindar dari hujan. Tanah disemprot dengan air suling sebanyak 10 ml sekali sehari untuk menjaga kelembapan tanah. Setelah 7 hari, sampel digali dengan hati – hati dan dicuci dengan air suling untuk menghilangkan tanah yang menempel. Setelah sampel dicuci, sampel dikeringkan. Sampel yang tidak dapat dicuci untuk menghilangkan tanah yang menempel difoto untuk mengamati disintegrasi secara visual (Atika Adnan et al., 2023). Kemudian, sampel ditimbang untuk mendapatkan massa akhir setelah dikubur (w_1). Laju biodegradasi dihitung dengan persamaan berikut.

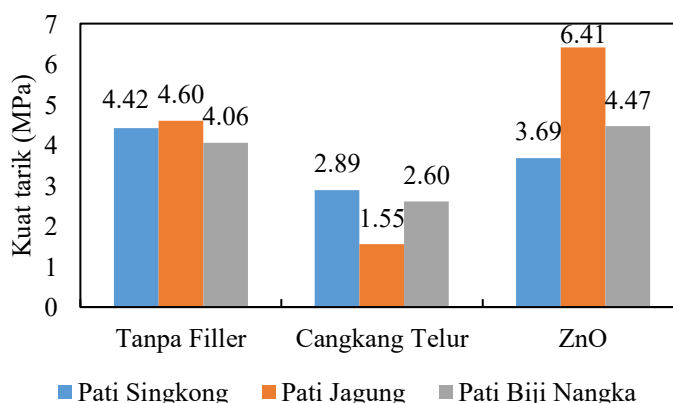
$$\text{Laju biodegradasi (\%)} = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \times 100$$

Software statistik Minitab 20 digunakan untuk menganalisis data hasil penelitian yang diperoleh melalui analisis varians (ANOVA). Tingkat kepercayaan secara statistik sebesar 90% ($\alpha = 0,1$) dengan dasar pengambilan keputusan berdasarkan nilai *p-value* < 0,1. Penelitian menggunakan rancangan *multilevel factorial design* yang terdiri atas dua faktor dengan masing – masing terdiri dari tiga taraf uji yaitu faktor jenis pati dengan taraf pati singkong, pati jagung, dan pati biji nangka dan faktor jenis filler dengan taraf cangkang telur, seng oksida, dan tanpa *filler*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengaruh variasi pati dan *filler* terhadap kekuatan mekanik bioplastik

Nilai kuat tarik menjadi salah satu parameter penting dalam pengembangan bioplastik karena semakin tinggi nilainya menunjukkan bahwa bioplastik dapat melindungi produk jika akan difungsikan sebagai kemasan. Gambar 1 menunjukkan bioplastik dengan kombinasi formula jenis pati yaitu pati jagung dan jenis *filler* yaitu ZnO menghasilkan bioplastik dengan kuat tarik tertinggi dibandingkan kombinasi lainnya. Sinergi antara pati dan *filler* baik dengan ZnO sebagai *reinforcing agent* efektif ikut menahan beban tarik. Nilai kuat tarik standar plastik konvensional berdasarkan SNI ISO 17557:2011 yaitu sebesar 24,7 – 3022 MPa dan nilai kuat tarik standar plastik *biodegradable* berdasarkan SNI 7818:2014 yaitu minimal 1,343 MPa (Gabriel et al., 2021). Dari hasil penelitian ini, semua matriks bioplastik yang diperoleh memenuhi kriteria kuat tarik standar plastik *biodegradable* sesuai SNI 7818:2014.



Gambar 1. Grafik hubungan variasi pati dan *filler* terhadap kuat tarik bioplastik

Dari data yang diperoleh pada penelitian ini, kuat tarik pada bioplastik yang dihasilkan lebih signifikan dipengaruhi oleh faktor jenis *filler* yang digunakan. Hal ini ditandai dengan nilai *p value* < 0,1. Sementara itu, faktor jenis pati dan interaksi kedua variabel yaitu antara jenis pati dan jenis *filler* tidak signifikan berpengaruh terhadap nilai kuat tarik pada penelitian ini. Boey et al. (2022) menyebutkan faktor – faktor yang mempengaruhi kuat tarik pada bioplastik dengan *reinforced*

material yaitu jenis *filler*, aspek rasio, *filler loading*, orientasi. Jenis pati dengan rasio amilosa dan amilopektin yang bervariasi secara mekanik mempengaruhi sifat dasar matriks seperti fleksibilitas dan kemampuan pembentukan film. Namun, perbedaan umumnya masih berada dalam rentang sifat mekanik yang relatif moderat karena berbasis polisakarida dengan gugus hidroksil yang dominan. Pada Gambar 3 terlihat nilai kuat tarik tidak terlalu berbeda dengan adanya perbedaan variasi jenis pati pada kondisi tanpa *filler* yaitu berkisar antara 4,06 – 4,42 MPa. Sementara itu, penambahan *filler* memberikan perubahan kuat tarik yang relatif lebih besar karena keberadaan *filler* dapat berpengaruh ke interaksi antarmuka sehingga dapat mempengaruhi kuat tarik. Penambahan *filler* pada bioplastik tidak hanya meningkatkan sifat dari matriks polimer pada bioplastik namun juga menurunkan biaya dari produk yang dihasilkan (Homavand et al., 2024).

Produk samping pangan seperti cangkang telur kaya akan kalsium karbonat dapat memperkuat kinerja bioplastik dan memberikan kestabilan terhadap suhu dan ketahanan terhadap air (Lopes et al., 2023). CaCO_3 sebagai *filler* dapat meningkatkan kekakuan dan memperbaiki sifat kerapuhan sehingga bioplastik menjadi tidak mudah sobek. Pada penelitian ini didapatkan bahwa keseluruhan bioplastik yang menggunakan *filler* cangkang telur justru memiliki kuat tarik yang lebih rendah dibandingkan tanpa *filler* dan ZnO. Fenomena ini menunjukkan bahwa cangkang telur belum mampu berperan sebagai penguat (*reinforcement*). Temuan serupa juga didapat oleh Qomariah et al. (2022) yang menggunakan cangkang telur sebagai *filler*.

Cangkang telur didominasi oleh kalsium karbonat memiliki ukuran partikel yang lebih besar dan tidak reaktif secara kimia terhadap matriks pati sehingga ikatan yang terbentuk hanya bersifat fisik (*mechanical interlocking*) yang mengakibatkan mudah terjadi retakan mikro saat diberi beban tarik. Tegangan tidak dapat ditransfer jika terdapat celah antara matriks dan *filler* sehingga tegangan lebih rendah dibanding dengan yang interaksi antara *filler* dan matriksnya tidak ada celah (Boey et al., 2022). Adanya celah (*gap*) antara matriks pati dengan *filler* dapat menimbulkan efisiensi transfer tegangan lebih rendah karena adhesi antarmuka lemah. Retakan jadi mudah terbentuk diantara celah sehingga kuat tarik menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, cangkang telur perlu dimodifikasi terlebih dahulu agar dapat berinteraksi dengan baik pada matriks pati. Beberapa pendekatan yang bisa dilakukan yaitu dengan reduksi ukuran partikel agar luas permukaan lebih besar, optimasi penambahan *plasticizer* karena jika jumlahnya berlebihan juga dapat menurunkan kuat tarik, dan dengan penambahan *coupling agent* agar dapat membentuk jembatan antara komponen hidrofilik dan hidrofobik pada matriks bioplastik.

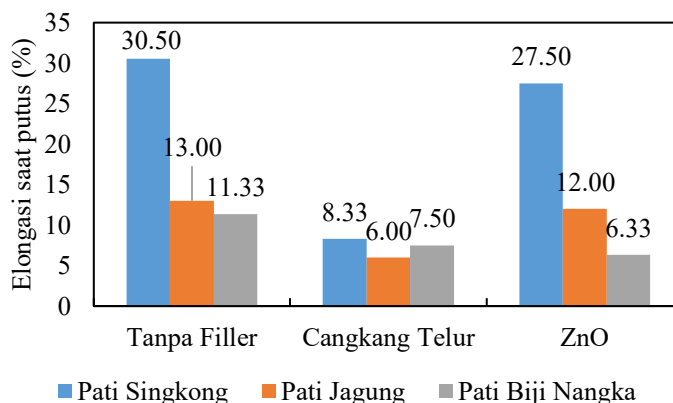
Filler ZnO dapat berperan sebagai penguat dengan nilai kuat tarik yang lebih tinggi pada bioplastik dengan *filler* ZnO. Meningkatnya nilai kuat tarik disebabkan ion logam Zn^{2+} menjadi penghubung dan pengganti ikatan hidrogen intramolekul dan intermolekul yang hilang saat sudah ditambahkan pati dan *plasticizer* (Agustin & Padmawijaya, 2016). Secara umum pada penelitian ini bioplastik dengan *filler* ZnO memiliki nilai kuat tarik lebih tinggi dibandingkan dengan bioplastik tanpa *filler* dan cangkang telur. Hal ini dapat disebabkan karena ZnO memiliki ukuran partikel yang kecil dibandingkan cangkang telur sehingga luas permukaan tinggi dan adhesi antarmuka matriks pati dan *filler* juga menjadi lebih tinggi.

Elongasi saat putus adalah kemampuan peregangan panjang film dari panjang awal hingga titik putus (Lubis et al., 2020). Semakin besar nilai elongasi, maka bioplastik lebih elastis dan tidak mudah sobek (Nisah, 2017). Gambar 2 menunjukkan perbandingan antar formula bioplastik dengan nilai elongasi saat putus.

Kombinasi formula pati singkong tanpa *filler* menghasilkan bioplastik dengan nilai elongasi saat putus yang paling tinggi dibanding kombinasi formula lainnya. Nilai elongasi standar plastik konvensional berdasarkan SNI ISO 17557:2011 yaitu sebesar 21 – 220 % dan nilai elongasi standar plastik *biodegradable* berdasarkan SNI 7818:2014 yaitu 400 – 1220 % MPa (Gabriel et al., 2021). Dari hasil penelitian ini, matriks bioplastik yang memenuhi kriteria elongasi standar plastik *biodegradable* sesuai SNI 7818:2014 yaitu bioplastik dengan kombinasi pati biji nangka dan ZnO serta bioplastik dengan kombinasi pati singkong tanpa *filler*. Secara umum, penambahan *filler* baik cangkang telur maupun ZnO menurunkan nilai elongasi dibandingkan jika tanpa *filler* pada berbagai variasi jenis pati. Hal ini serupa dengan studi yang dilakukan oleh Gabriel et al. (2021).

Dari data yang diperoleh pada penelitian ini, elongasi saat putus pada bioplastik lebih signifikan dipengaruhi oleh faktor jenis pati yang digunakan. Hal ini ditandai dengan nilai *p value* < 0,1. Sementara itu, faktor jenis *filler* dan interaksi kedua variabel yaitu antara jenis pati dan jenis *filler* tidak

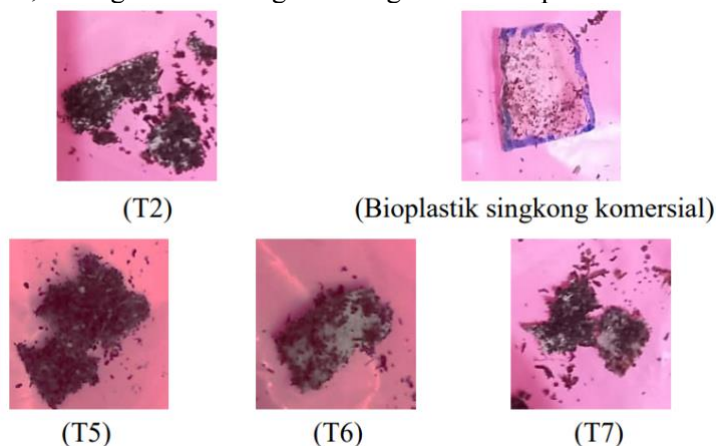
signifikan berpengaruh terhadap nilai elongasi saat putus pada penelitian ini. Oleh karena itu, variasi jenis pati lebih berpengaruh pada kemampuan regangan (elongasi) dan variasi jenis *filler* lebih menentukan kuat tarik bioplastik.



Gambar 2. Grafik hubungan variasi pati dan *filler* terhadap elongasi saat putus

3.2. Pengaruh variasi pati dan *filler* terhadap biodegradabilitas bioplastik

Uji biodegradabilitas dilakukan untuk melihat proses penguraian bioplastik di alam dengan bantuan mikroorganisme (Kristiningsih et al., 2024). Pada Gambar 3 terlihat hasil bioplastik yang tersisa dan sulit dibersihkan untuk ditimbang pengurangan massanya. Pada kondisi tanah dan lingkungan yang sama, biodegradasi masing – masing variasi sampel terlibat berbeda.



Gambar 3. Tampilan bioplastik setelah *soil burial test* selama 7 hari

Setelah bioplastik ditimbun selama 7 hari di tanah dengan suhu ruang dan pH 7, secara umum bioplastik yang masih tersisa pada hari ketujuh yaitu bioplastik T2, T5, T6, dan T7. Bioplastik singkong komersial yang dijadikan sebagai pembanding terlihat masih utuh tampilannya sebagaimana kondisi awal yaitu berukuran 2 x 2 cm. Sementara itu seluruh sampel lainnya telah mengalami degradasi ditandai dengan fisik yang rapuh. Sampel lainnya telah melebur dengan tanah dan tidak tampak sisa yang dapat teramati. Matriks pati tersusun atas amilosa dan amilopektin yang kaya akan gugus hidroksil (-OH). Keberadaan gugus ini menyebabkan bioplastik bersifat hidrofilik sehingga mudah menyerap air (Yustianto et al., 2024). Penyerapan air ini mempermudah masuknya mikroorganisme dalam matriks polimer (Rumaisha et al., 2025). Dengan demikian potensi degradasi menjadi meningkat,

Hasil dari penelitian ini sejalan dengan hasil yang diperoleh oleh A. H. D. Abdullah et al., (2020) yaitu penggunaan ZnO menurunkan laju biodegradasi dikarenakan ZnO memiliki sifat antimikroba. Selain itu, kelebihan ZnO sebagai *filler* untuk bioplastik yaitu bersifat ramah lingkungan dan tidak beracun (Lubis et al., 2020). Fenomena serupa juga terjadi pada penelitian Muhammad et al. (2020) yaitu semakin banyak kandungan *filler* yang berfungsi sebagai penguat didalam formulasi bioplastik, maka matriks bioplastik akan lebih sulit untuk mengalami degradasi. Jika dibandingkan dengan bioplastik yang menggunakan *filler* cangkang telur, laju biodegradasi ZnO lebih lambat ditandai dengan masih tersisanya sampel pada tanah.

3.3. Pengaruh variasi pati dan *filler* terhadap kemampuan *swelling* bioplastik

Salah satu karakteristik penting bioplastik yaitu kemampuan mengabsorpsi air (Behera et al., 2022). Kualitas bioplastik dinyatakan rendah jika kemampuan dalam mengabsorpsi air tinggi karena ini menunjukkan ketahanan saat penyimpanan dan penggunaan cenderung rendah (Muhammad et al., 2020). Secara umum, pati yang tidak ada atau hanya sedikit mengandung amilosa akan mengabsorpsi air lebih intensif dibandingkan pati yang mengandung banyak amilosa (Atika Adnan et al., 2023; Vamadevan & Bertoft, 2020). Sebaliknya, amilopektin sangat mempengaruhi sifat *swelling*. Amilopektin memungkinkan terjadinya *swelling* dengan menjaga integritas matriks tetap utuh sampai matriks kolaps (Vamadevan & Bertoft, 2020).

Pada penelitian ini, jenis pati yang digunakan bersumber dari singkong, jagung, dan biji nangka. Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa bioplastik dari pati singkong memiliki kemampuan *swelling* yang lebih tinggi dibandingkan bioplastik dari pati jagung dan pati biji nangka. Berdasarkan data dari penelitian terdahulu yang terdapat pada Tabel 2, terlihat bahwa pati singkong memiliki kadar amilopektin yang paling tinggi dan kadar amilosa yang paling rendah dibandingkan kadar amilopektin dan amilosa pada pati jagung dan biji nangka sehingga bioplastik dari pati singkong lebih mudah *swelling* dibandingkan bioplastik dari jenis pati lainnya.

Tabel 3. Hubungan Jenis Pati dan Jenis *Filler* terhadap Kemampuan *Swelling*

Run	Jenis Pati	Jenis <i>Filler</i>	Nilai <i>Swelling</i> (%)			Rata-Rata <i>Swelling</i> (%)	Standar Deviasi
T1	Pati Singkong	Tanpa <i>Filler</i>	61,364	59,596	62,162	61,041	1,313
T2	Pati Singkong	Cangkang Telur	60,000	59,677	59,259	59,646	0,371
T3	Pati Singkong	ZnO	59,016	57,500	59,341	58,619	0,983
T4	Pati Jagung	Tanpa <i>Filler</i>	31,915	30,882	33,333	32,044	1,231
T5	Pati Jagung	Cangkang Telur	30,645	29,851	29,577	30,024	0,555
T6	Pati Jagung	ZnO	28,125	27,419	28,205	27,916	0,432
T7	Pati Biji Nangka	Tanpa <i>Filler</i>	30,233	29,091	30,588	29,971	0,782
T8	Pati Biji Nangka	Cangkang Telur	29,245	30,000	28,261	29,169	0,872
T9	Pati Biji Nangka	ZnO	28,125	26,829	28,947	27,967	1,068

Dari data yang diperoleh, kemampuan *swelling* pada bioplastik yang dihasilkan signifikan dipengaruhi oleh faktor jenis pati dan jenis *filler* yang digunakan. Hal ini ditandai dengan nilai *p value* < 0,1. Sementara itu, interaksi kedua variabel yaitu antara jenis pati dan jenis *filler* tidak signifikan berpengaruh terhadap nilai daya serap air pada penelitian ini.

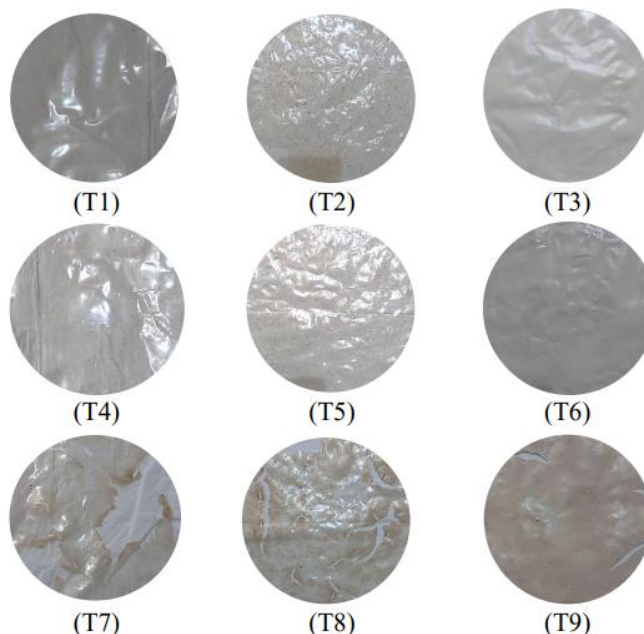
Persentase *swelling* yang tinggi menandakan bahwa semakin besar pula air yang diserap akibat struktur polimer yang lebih longgar (Nurulaeni, 2025). Nilai *swelling* dapat mencerminkan kekuatan ikatan dalam jaringan polimer. Secara umum, penambahan *filler* cangkang telur sebagai sumber CaCO_3 dan seng oksida (ZnO) pada matriks bioplastik di ketiga jenis pati dapat menurunkan daya serap air dibandingkan tanpa penambahan *filler*. Adanya ikatan hidrogen antara matriks pati dan ZnO akan mengurangi ketersediaan gugus hidroksil dari matriks untuk berikatan dengan molekul air. ZnO sebagai *filler* dapat menciptakan jalur yang lebih sulit untuk air maupun kelembapan untuk menembus matriks pati (A. H. D. Abdullah et al., 2020). Selain itu, ZnO memiliki sifat hidrofobik sehingga keberadaannya pada matriks dapat menutupi rongga yang ada sehingga daya serap air menjadi lebih rendah (Agustin & Padmawijaya, 2016). Penambahan cangkang telur menurunkan nilai hidrofilisitas sehingga keberadaannya dapat mengisi ruang pada matriks bioplastik dan menurunkan daya serap air (Qomariah et al., 2022).

Jika dibandingkan dari sisi daya serap air, penggunaan ZnO sebagai *filler* lebih baik dibandingkan cangkang telur dibuktikan dengan nilai daya serap air yang lebih rendah daripada matriks bioplastik yang menggunakan cangkang telur. Penambahan cangkang telur sebagai sumber CaCO_3 pada bioplastik dengan berbagai jenis pati terlihat menurun tidak terlalu jauh nilai daya serap airnya dibandingkan dengan matriks bioplastik tanpa *filler*. Hal ini mungkin dapat disebabkan karena CaCO_3 sendiri juga merupakan senyawa yang higroskopis sehingga ada sifat yang cenderung mudah menyerap air (Nuriyah et al., 2019). Di sisi lain, bioplastik berbasis pati umumnya memiliki karakteristik hidrofilik (Abdullah & Wahab, 2020; Veiga-Santos et al., 2007). Sorbitol sebagai

plasticizer yang ditambahkan dalam formulasi bioplastik juga memiliki fungsi sebagai humektan yang dapat mengikat air dan bersifat higroskopis (Lestari et al., 2020). Hal ini menunjukkan bahwa selain karakteristik bioplastik berbasis pati yang cenderung hidrofilik dan *plasticizer* sorbitol yang juga bersifat humektan, penambahan cangkang telur sebagai sumber CaCO_3 sebagai *filler* berpotensi berkontribusi terhadap besaran kapasitas serap air dari bioplastik.

3.4. Pengaruh variasi pati dan *filler* terhadap tampilan fisik bioplastik

Morfologi bioplastik dari berbagai jenis pati dan *filler* tampak pada Gambar 4. Semua permukaan sampel tampak homogen. Bioplastik pada T2, T5, dan T8 yang terdapat *filler* cangkang telur pada formulasinya terlihat bintik – bintik pada permukaan bioplastiknya. Semua sampel dapat dengan mudah dilepaskan dari cetakan, tidak ada separasi atau gelembung udara di permukaannya serta tidak ada bagian dari permukaan bioplastik yang lengket. Permukaan bioplastik tampak berbeda teksturnya dimana sisi yang menyentuh cetakan bersifat halus sementara sisi yang terpapar udara cenderung kasar. Kompatibilitas yang baik dalam produksi formula yang homogen dapat teramati selama proses dan sampel bioplastik yang dihasilkan (Gómez-Aldapa et al., 2020). Campuran polimer yang diperoleh menunjukkan bahwa larutan homogen kental yang didapat setelah proses gelatinisasi pati terbentuk dengan baik sehingga produk bioplastik yang diperoleh juga homogen dan tidak terjadi separasi.



Gambar 4. Tampilan fisik bioplastik dari berbagai jenis pati dan *filler*

Pada sampel yang menggunakan pati biji nangka pada berbagai jenis *filler* (T7, T8, T9), semua sampel tampak berwarna kecoklatan sebagaimana warna dasar dari pati biji nangka yang didapatkan dari proses ekstraksi sebelumnya yang tampak pada Gambar 5. Kemudian, bioplastik pada ketiga sampel yang menggunakan pati biji nangka tampak seperti retak (*crack*) pada beberapa titik di lembaran bioplastik ukuran 20 x 20 cm setelah dikeringkan pada suhu ruang selama 2 – 3 hari. *Appearance* bioplastik yang dihasilkan pada penelitian ini hampir sama dengan penelitian yang dilakukan Nguyen et al. (2022) yang menggunakan sumber pati dari biji nangka yaitu permukaan lembaran bioplastik tampak ada yang terbelah dan pada rasio pati dan *plasticizer* sebesar 3:1 terdapat retakan mikro pada permukaan sampel.

Kemunculan retakan ini kemungkinan dapat disebabkan karena adanya gelembung ukuran mikro yang terjadi selama proses gelatinisasi pada suhu 80 – 85 °C. Gelembung mikro muncul dikarenakan ikatan hidrogen pada pati yang mulai putus ketika mencapai suhu gelatinisasi dan molekul air kemudian mulai masuk ke dalam gugus hidroksil dari molekul pati (Nguyen et al., 2022). Dalam penelitian ini, proses tidak dilakukan tahapan vakum sehingga kemungkinan terjadinya gelembung mikro tidak terhindarkan. Proses vakum dapat membantu menghilangkan udara terperangkap sehingga matriks bioplastik dapat lebih rapat dan halus. Disisi lain, gelembung udara mikro yang dihasilkan

oleh pencampuran dan pengadukan ketika proses gelatinisasi tidak dapat dihilangkan sepenuhnya selama proses sebelum dicetak.



Gambar 5. Tampilan fisik biji nangka dan pati biji nangka

Jika dibandingkan dari segi transparansi, bioplastik dengan *filler* cangkang telur dan tanpa *filler* bersifat tembus pandang (transparan). Sementara itu, bioplastik dengan *filler* ZnO cenderung berwarna *doff* (tidak mengkilap) dan tidak tembus pandang. Permukaan bioplastik dengan *filler* ZnO juga tampak lebih halus dibandingkan yang lainnya. Penelitian yang dilakukan oleh Maulida et al. (2018) menunjukkan fenomena bioplastik tanpa *filler* lebih tipis dan permukaannya tidak terlalu halus yang disebabkan karena ketiadaan *filler* mengakibatkan bioplastik yang dihasilkan lebih rapuh dan morfologi permukaannya tidak terlalu rapat.

4. Kesimpulan

Sintesis bioplastik berbasis pati dengan *plasticizer* sorbitol dan modifikasi pati singkong, pati biji nangka, dan pati jagung serta variasi kondisi tanpa *filler*, cangkang telur, dan ZnO menunjukkan bahwa kedua faktor berpengaruh terhadap sifat fisik, mekanik, dan ketahanan air bioplastik. Bioplastik dengan *filler* ZnO pada semua jenis pati memiliki laju biodegradasi yang lebih lambat dibandingkan penggunaan *filler* cangkang telur. Semua matriks bioplastik yang diperoleh memenuhi kriteria kuat tarik standar plastik *biodegradable* dan dapat terdegradasi dalam 7 hari sesuai SNI 7818:2014. Namun, matriks yang memenuhi kriteria elongasi sesuai SNI 7818:2014 yaitu bioplastik dengan kombinasi pati singkong tanpa *filler* dan dengan *filler* ZnO. Komposisi bioplastik terbaik yang mendekati standar yaitu kombinasi pati singkong dan *filler* ZnO dengan kuat tarik 3,69 MPa, elongasi saat putus sebesar 27,50%, kapasitas *swelling* 59,02%, dan dapat terdegradasi dalam 7 hari.

Daftar Pustaka

- Abdullah, A. H. D., Putri, O. D., Fikriyyah, A. K., Nissa, R. C., Hidayat, S., Septiyanto, R. F., Karina, M., & Satoto, R. (2020). Harnessing the Excellent Mechanical, Barrier and Antimicrobial Properties of Zinc Oxide (ZnO) to Improve the Performance of Starch-based Bioplastic. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(12), 1259–1267. <https://doi.org/10.1080/25740881.2020.1738466>
- Abdullah, N. A. S., & Wahab, M. K. A. (2020). The Effect of Modified Jackfruit (*Artocarpus Heterophyllus* Lam.) Seed Starch on the Properties of Poly Lactic Acid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 957(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/957/1/012017>
- Agustin, Y. E., & Padmawijaya, K. S. (2016). Sintesis Bioplastik dari Kitosan-Pati Kulit Pisang Kepok dengan Penambahan Zat Aditif. *Jurnal Teknik Kimia*, 10(2), 40–48.
- Aliyatunnaim, N. A., Septina, N. D. L., Ginting, D. F. A., & Maharani, F. (2013). Karakteristik Pati Biji Nangka (*Artocarpus Heterophyllus*) yang Berpotensi sebagai Pengganti Gelatin pada Pembuatan Cangkang Kapsul Lunak. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi*, 9(2), 51–54. <https://doi.org/10.36499/psnst.v12i1.7184>
- Atika Adnan, N., Hanani Meriam Suhaimy, S., Arif Budiman Pauzan, M., & Fauzi, B. (2023). Effect of Polyvinyl Alcohol on Cassava and Potato Starch Plastic Film: Mechanical, Thermal and Swelling Properties. *Enhanced Knowledge in Sciences and Technology*, 3(2), 460–471. <https://doi.org/10.30880/ekst.2023.03.02.052>
- Behera, L., Mohanta, M., & Thirugnanam, A. (2022). Intensification of yam-starch based biodegradable bioplastic. *Environmental Technology & Innovation*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102180>
- Boey, J. Y., Lee, C. K., & Tay, G. S. (2022). Factors Affecting Mechanical Properties of Reinforced Bioplastics: A Review. *Polymers*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/polym14183737>

- Dewi, S. R., Widayasanti, A., & Putri, S. H. (2023). Pengaruh Konsentrasi Pati Singkong Terhadap Karakteristik Edible Film Berbahan Pati Singkong dengan Penambahan Ekstrak Daun Belimbing Wuluh. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 11(2), 158–167. <https://doi.org/10.21776/ub.jkptb.2023.011.02.05>
- Gabriel, A. A., Solikhah, A. F., & Rahmawati, A. Y. (2021). Tensile Strength and Elongation Testing for Starch-Based Bioplastics using Melt Intercalation Method: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1858(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012028>
- Gómez-Aldapa, C. A., Velazquez, G., Gutierrez, M. C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. *Materials Chemistry and Physics*, 239(August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027>
- Homavand, A., Cree, D. E., & Wilson, L. D. (2024). Polylactic Acid Composites Reinforced with Eggshell/CaCO₃ Filler Particles: A Review. *Waste*, 2(2), 169–185. <https://doi.org/10.3390/waste2020010>
- Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H., & Yu, L. (2020). Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.003>
- Kasmuri, N., & Zait, M. S. A. (2018). Enhancement of bio-plastic using eggshells and chitosan on potato starch based. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(3), 110–115. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.32.18408>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2025). *SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*. <https://sipsn.menlhk.go.id/>
- Khodijah, S., & Tobing, J. M. L. (2023). Tinjauan Plastik Biodegradable dari Limbah Tanaman Pangan sebagai Kantong Plastik Mudah Terurai. *Teknotan*, 17(1), 21. <https://doi.org/10.24198/jt.vol17n1.3>
- Kristiningsih, A., Wittriansyah, K., Hastuti, H. D., & Sodikin, J. (2024). Karakteristik Fisik Bioplastik Kitosan Dengan penambahan Selulosa Kulit Nipah (*Nypa fruticans*). *Journal of Marine Research*, 13(4), 721–730. <https://doi.org/10.14710/jmr.v13i4.47813>
- Lestari, R. A. S., Kasmiyatun, M., Dermawan, K., Aini, A. N., Riyati, N., & Putri, F. R. (2020). Bioplastic from Jackfruit Seeds and Rice. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 835(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/835/1/012035>
- Lopes, J., Ferreira, P., Coimbra, M. A., & Gonçalves, I. (2023). Influence of glycerol, eggshells, and genipin on hydrophobicity and rigidity of antioxidant locust bean milling dust-derived bioplastics. *LWT*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115409>
- Lubis, M., Harahap, M. B., Ginting, M. H. S., Sebayang, A. T., Chandra, T., Wangi, Y., & Jose. (2020). Mechanical, SEM and FTIR characteristics of bioplastics from mango seed starch with nanoparticle zinc oxide as filler and ethylene glycol as plasticizers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1003(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1003/1/012122>
- Maulida, L., Harahap, M. B., Alfarodo, Manullang, A., & Ginting, M. H. S. (2018). Utilization of jackfruit seeds (*Artocarpus heterophyllus*) in the preparing of bioplastics by plasticizer ethylene glycol and chitosan filler. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(1), 240–244.
- Muhammad, Ridara, R., & Masrullita. (2020). Sintesis Bioplastik dari Pati Biji Alpukat dengan Bahan Pengisi Kitosan. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 2(November), 85–100. <http://ejournalmapeki.org/index.php/JITKT/article/view/444>
- Nguyen, T. K., That, N. T. T., Nguyen, N. T., & Nguyen, H. T. (2022). Development of Starch-Based Bioplastic from Jackfruit Seed. *Advances in Polymer Technology* - Google Search. *Advances in Polymer Technology*. <https://doi.org/10.1155/2022/6547461>
- Nisah, K. (2017). Study Pengaruh Kandungan Amilosa dan Amilopektin Umbi-Umbian terhadap Karakteristik Fisik Plastik Biodegradable dengan Plasticizer Gliserol. *Biotik*, 5(2), 106–113.
- Nofrida, R., Shafira, N. A., & Alamsyah, A. (2024). Formulasi Penambahan Pati Jagung pada Kukis Mocaf. *Pro Food (Jurnal Ilmu Dan Teknologi Pangan)*, 3(9), 2312–2327.
- Nuriyah, L., Saroja, G., & Rohmad, J. (2019). The Effect of Calcium Carbonate Addition to Mechanical Properties of Bioplastic Made from Cassava Starch with Glycerol as Plasticizer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 546(4), 4–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/546/4/042030>

- Nurulaeni, S. (2025). Pembuatan dan karakterisasi bioplastik dari Pati Umbi Garut–karagenan dengan penambahan pemlastis Epoxidized Fatty Acid Methyl Ester (EFAME) dan pengikat. *Jurnal Teknik Mesin UIN Sunan Gunung Djati Bandung*, 58. <https://digilib.uinsgd.ac.id/109978/>
- Puca-Pacheco, M., Neira-Velázquez, M. G., Canché-Escamilla, G., Ascue-Caballero, M., Girao-Sánchez, A. A., & Tacuri-Puca, C. A. (2025). Preparation and Characterization of Bioplastics Based on Sweet Potato Peel Starch, Aloe vera and Eucalyptus Oil. *Polymers*, 17(21), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym17212950>
- Qomariah, S., Syahbanu, I., & Ardiningsih, P. (2022). Bioplastic Based on Taro Starch Modified Polyvinyl Alcohol and Eggshell (Starch-PVA-CT) with Degradability Study. *EduChemia (Jurnal Kimia Dan Pendidikan)*, 7(2), 223. <https://doi.org/10.30870/educhemia.v7i2.14660>
- Rahma, M., Dewi, R., Wijaya, R., Program, R. S., Sarjana, S., Teknologi, T., Kimia, R., Jurusan, I., Kimia, T., & Lhokseumawe, N. (2025). Pembuatan Plastik Biodegradable dari Pati Singkong (Manihot esculenta) dan Cangkang Telur dengan Penambahan Gliserol sebagai Plasticizer. *Jurnal Teknologi*, 25(3), 243–247. <https://e-jurnal.pnl.ac.id/teknologi/article/view/8203>
- Vamadevan, V., & Bertoft, E. (2020). Observations on the impact of amylopectin and amylose structure on the swelling of starch granules. *Food Hydrocolloids*, 103, 105663. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105663>
- Veiga-Santos, P., Oliveira, L. M., Cereda, M. P., & Scamparini, A. R. P. (2007). Sucrose and inverted sugar as plasticizer. Effect on cassava starch-gelatin film mechanical properties, hydrophilicity and water activity. *Food Chemistry*, 103(2), 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.048>
- Yustianto, A. H., Sully, D. A., Fauzi, A. D., & Amalia, R. (2024). The Effect of Differences in the Use of Flour and Plasticizers in Making Biodegradable Plastic on the Physical Characteristics of Beeswax. *Journal of Vocational Studies on Applied Research*, 6(2), 14–21. <https://doi.org/10.14710/jvsar.v6i2.24257>

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Industri Petrokimia Banten dalam bidang penulisan artikel ilmiah tahun 2026.