

Pengaruh Suhu Pemrosesan Terhadap Kekuatan Tarik Bioplastik PLA (*Polylactic Acid*) dan Tepung Kulit Singkong

Moch. Kharis Ashrori^{1*}, Dewi Puspitasari², Andita Nataria Fitri Ganda³

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

E-mail: *mochashrori.22025@mhs.unesa.ac.id

Abstrak: Plastik konvensional banyak digunakan karena sifat mekaniknya yang baik, tetapi sulit terurai secara alami sehingga menimbulkan permasalahan lingkungan. Oleh karena itu, bioplastik berbasis sumber daya terbarukan, seperti *Polylactic Acid* (PLA) dengan penambahan tepung kulit singkong sebagai *filler* alami, dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi suhu pemrosesan terhadap sifat mekanik dan laju biodegradasi bioplastik PLA–tepung kulit singkong. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan variasi suhu pemrosesan 200 °C, 225 °C, dan 250 °C. Material dengan komposisi 70 wt% PLA dan 30 wt% tepung kulit singkong diproses menggunakan *injection molding* melalui teknik *melt intercalation*, kemudian diuji tarik sesuai standar ASTM D638 Tipe I. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu pemrosesan 225 °C menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 67 MPa. Peningkatan suhu hingga 250 °C menyebabkan penurunan kekuatan tarik dan elongasi akibat degradasi termal, meskipun meningkatkan modulus elastisitas dan laju biodegradasi. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian suhu pemrosesan berperan penting dalam menentukan hubungan antara proses, struktur material, dan sifat mekanik bioplastik PLA–tepung kulit singkong.

Kata kunci: Bioplastik, *Polylactic Acid*, Tepung Kulit Singkong, Suhu Pemrosesan, Sifat Tarik.

Abstract Conventional plastics are widely used due to their good mechanical properties; however, they are difficult to degrade naturally, leading to environmental problems. Therefore, bioplastics based on renewable resources, such as *Polylactic Acid* (PLA) with the addition of cassava peel flour as a natural filler, have been developed as an environmentally friendly alternative. This study aimed to analyze the effect of processing temperature variations on the mechanical properties and biodegradation rate of PLA–cassava peel flour bioplastics. An experimental method was employed with processing temperatures of 200 °C, 225 °C, and 250 °C. The material composition consisted of 70 wt% PLA and 30 wt% cassava peel flour, which was processed using injection molding through the melt intercalation technique, followed by tensile testing according to ASTM D638 Type I standards. The results showed that a processing temperature of 225 °C produced the highest tensile strength of approximately 67 MPa. Increasing the temperature to 250 °C led to a decrease in tensile strength and elongation due to thermal degradation, although the elastic modulus and biodegradation rate increased. These findings indicate that controlling the processing temperature plays an important role in determining the relationship between processing conditions, material structure, and mechanical properties of PLA–cassava peel flour bioplastics.

Keywords: Bioplastic, *Polylactic Acid*, Cassava Peel Flour, Processing Temperature, Tensile Properties.

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

PENDAHULUAN

Plastik merupakan material yang sangat umum digunakan di Indonesia karena sifatnya yang fleksibel, kuat, ringan, transparan, mudah dikombinasikan dengan material lain, serta tidak korosif (Mukhlisien et al., 2021). Namun, sebagian besar plastik yang beredar adalah polimer sintetik berbasis petrokimia seperti *Polypropylene* (PP), *Polyethylene* (PE), *Polyvinyl Chloride* (PVC), *Polystyrene* (PS), dan *Polyethylene Terephthalate* (PET) yang sulit didegradasi oleh mikroorganisme (Wijayanti et al., 2016). Ketergantungan pada polimer sintetik ini memicu timbunan limbah plastik yang sulit terurai, sementara pembakarannya menghasilkan karbon dioksida dan gas beracun yang mencemari udara dan berbahaya bagi

kesehatan manusia (Fauzi, 2023). Pemerintah Indonesia telah berupaya mengurangi penggunaan plastik sekali pakai melalui kebijakan seperti program Diet Kantong Plastik dan pengembangan pasar bebas plastik (Tubagus Achmad Faqih, 2022). Namun, penerapannya belum menyeluruh sehingga belum mampu mengatasi permasalahan limbah plastik secara fundamental.

Salah satu solusi alternatif adalah mengembangkan bioplastik berbasis sumber daya terbarukan. Bioplastik adalah plastik biodegradable yang dibuat dari biopolimer alami dan dapat terurai di lingkungan (Khodijah & Tobing, 2023). Di Indonesia, limbah kulit singkong merupakan bahan baku potensial karena ketersediaannya melimpah dari

industri tapioka, keripik, dan olahan singkong lainnya. Kulit singkong mengandung pati hingga 20–59% (Andi Alfian, Dewi Wahyuningtyas, 2022), sehingga dapat menjadi bahan pengisi (*filler*) alami yang memperbaiki sifat mekanik dan mempercepat degradasi bioplastik (Thakkar et al., 2025). Namun, bioplastik berbasis pati saja cenderung rapuh dan memiliki kekuatan tarik rendah, sehingga diperlukan penguatan dengan polimer lain seperti *Polylactic Acid* (PLA).

PLA merupakan polimer alifatik yang berasal dari sumber nabati seperti pati jagung dan tebu (Wibowo et al., 2024). PLA memiliki sifat mekanik relatif baik, tetapi laju biodegradasinya lambat. Kombinasi PLA dan tepung kulit singkong berpotensi menghasilkan material dengan kekuatan tarik lebih baik sekaligus mudah terdegradasi. Akan tetapi, sifat akhir bioplastik ini sangat dipengaruhi oleh kondisi pemrosesan, terutama suhu. PLA memiliki temperatur transisi gelas (T_g) sekitar 60°C dan titik leleh (T_m) sekitar 170°C. Pemrosesan di bawah atau di atas kisaran ini dapat memengaruhi kristalinitas, distribusi filler, homogenitas campuran, serta potensi degradasi rantai polimer (Dmitruk et al., 2023).

Beberapa penelitian telah mengevaluasi pengaruh suhu terhadap bioplastik berbasis pati kulit singkong. Menurut Made et al., (2019) suhu dan pH gelatinisasi berpengaruh terhadap sifat mekanik dan biodegradabilitas bioplastik pati kulit singkong, sedangkan penelitian lain oleh Ni Made Heni Epriyanti et al., (2016) mengkaji pengaruh suhu dan lama pengeringan pada komposit pati-kitosan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa suhu berpengaruh terhadap kuat tarik, elongasi, dan laju degradasi, tetapi sifat mekanik yang dicapai masih rendah (kekuatan tarik maksimum ± 1 MPa) karena tidak melibatkan PLA sebagai matriks penguat. Sementara itu, menurut Adina et al., (2021) suhu pengeringan berpengaruh pada bioplastik pulp singkong-kitosan, tetapi belum menggabungkan PLA sehingga struktur morfologinya masih berpori dan kurang homogen. Gap ini menunjukkan bahwa kajian suhu pemrosesan pada sistem PLA–tepung kulit singkong belum banyak dilakukan, padahal sangat menentukan kualitas material.

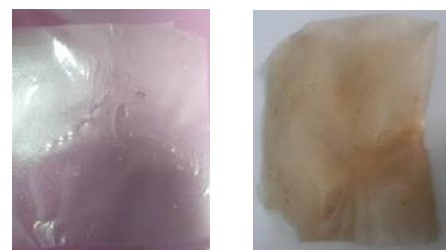
Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pemrosesan terhadap kekuatan tarik bioplastik berbasis PLA dan tepung kulit singkong guna memperoleh material bioplastik dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan hasil yang telah dilaporkan sebelumnya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi suhu pemrosesan yang optimal dalam menghasilkan bioplastik dengan sifat mekanik yang unggul.

DASAR TEORI

Bioplastik

Bioplastik adalah polimer yang dapat berubah menjadi biomassa, air (H_2O), karbon dioksida (CO_2) atau metana (CH_4) melalui tahapan depolimerisasi dan mineralisasi. Depolimerisasi terjadi karena enzim ekstraseluler yang terdiri atas endo dan ekso enzim. Endo enzim memutus ikatan internal pada rantai utama polimer secara acak, dan ekso enzim, memutus unit monomer pada rantai utama secara berurutan. Bagian-bagian oligomer yang terbentuk dipindahkan ke dalam sel dan menjadi mineralisasi. Proses mineralisasi membentuk CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2O , garam-garam, mineral dan biomassa (Tedeschi et al., 2023 ; Fadzil & Othman, 2021). Jenis-jenis bioplastik dapat dibedakan berdasarkan sumber bahan baku dan kemampuan degradasi. Berdasarkan sumbernya, bioplastik dibagi menjadi bioplastik berbasis pati dan turunannya (*thermoplastic starch*, TPS), bioplastik berbasis selulosa, bioplastik berbasis minyak nabati atau protein hewani/tumbuhan (misalnya protein kedelai, gelatin), dan bioplastik berbasis poliester alifatik yang diproduksi mikroba seperti *polyhydroxyalkanoates* (PHA) dan *polyhydroxybutyrate* (PHB).

Dari sisi sifat, bioplastik umumnya memiliki kelebihan berupa kemampuan terurai secara alami, berasal dari sumber daya terbarukan, dan berpotensi mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Namun kelemahannya antara lain sifat mekanik dan ketahanan termal yang masih di bawah plastik konvensional, serta biaya produksi yang relatif lebih tinggi. Banyak penelitian terkini menunjukkan bahwa kombinasi pati dengan polimer *biodegradable* lain, atau modifikasi pati dengan *plastisizer* dan *filler* alami, mampu meningkatkan sifat mekaniknya (Chinaglia et al., 2024; Parera & Gusriani, 2021). Oleh karena itu, banyak penelitian saat ini berfokus pada pengembangan formulasi, proses, untuk meningkatkan performa bioplastik agar dapat bersaing dengan plastik konvensional (Negrete-bolagay & Guerrero, 2024).



Gambar 1. Bioplastik Berbahan Alami
Sumber : (Bioplastik et al., 2019 ; Illing & MB, 2022)

PLA (*Polylactic Acid*)

PLA merupakan jenis polimer dengan banyak keunggulan diantaranya merupakan material yang terbuat dari bahan baku pertanian yang terbarukan (*renewability*), dan mampu dikomposkan sepenuhnya secara alami (*biocompostability*) dengan tingkat polusi rendah, sehingga dapat mengurangi akumulasi limbah plastik yang menjadi masalah global saat ini. PLA memiliki berbagai aplikasi biomedis, pengemasan, serat tekstil, dan barang-barang teknis. Di bawah

pengaruh panas, bakteri, dan cahaya, degradasi PLA dapat terjadi secara alami (Suryani et al., 2022). Kekuatan dan kekakuannya yang tinggi memungkinkan aplikasi PLA pada berbagai industri misalnya untuk dijadikan biokomposit dengan menggunakan berbagai macam proses seperti ekstrusi, *injection molding*, pemintalan, *compression molding*, dan *thermoforming*.

TABEL 1. Perbandingan Sifat Mekanik PLA dengan Polimer

Properties Polymer	Tensile Modulus (GPa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation (%)
Polylactic Acid (PLA)	3.2	50	2.5
Polyvinyl chloride (PVC)	2.6	35	3.0
Polypropylene (PP)	1.4	35	10
Polystyrene (PS)	3.4	49	2.5
Nylon	2.9	71	5

Sumber : (Laura & Lorenzo, 2020)

TABEL 2. Sifat Termal PLA

Sifat Termal PLA	
Berat Jenis	1.5
Energi Permukaan (dynes)	36-40
Suhu Leleh (°C)	170-220
Berat Molekul (Dalton)	Sekitar 1.6×10^5
Indeks Aliran Lelehan (g/10 menit)	4-22
Kristalinitas (%)	5-35
Suhu Transisi Kaca	50-75
Parameter Kelarutan ($J^{0.5}/cm^{1.5}$)	21

Sumber : (Pantani et al., 2014 ; Ranakoti et al., 2022)

PLA memiliki kemiripan sifat mekanik dengan berbagai polimer, seperti yang diilustrasikan dalam Tabel 1, seperti polivinil klorida, polistirena, dll., PLA dianggap sebagai salah satu biopolimer yang paling cepat berkembang di penggunaan material komposit (Liang et al., 2021). Perbandingan sifat PLA dengan polimer biasa menunjukkan bahwa PLA memiliki modulus tarik yang lebih tinggi daripada PVC, PP, dan nilon sementara memiliki kekuatan lentur yang lebih tinggi daripada PP, yang menunjukkan potensi PLA, yang dapat dieksplorasi dengan berbagai cara dalam domain rekayasa. PLA memiliki potensi yang sangat besar untuk perbaikan sifat fisik dan mekanisnya (Bajpai et al., 2022). Selain itu, PLA juga memiliki sifat termal.

Sifat termal PLA menentukan ketahanan material terhadap temperatur dan sangat berkaitan dengan titik leleh serta stabilitas struktur selama aplikasi. PLA merupakan polimer *biodegradable* semikristalin yang disintesis dari asam laktat dan memiliki temperatur transisi kaca (T_g) sekitar 55–65 °C, yaitu suhu saat material berubah dari kondisi padat menjadi lunak. Nilai T_g berpengaruh langsung terhadap kemampuan proses dan batas suhu penggunaan, karena PLA dengan T_g rendah akan mudah melunak pada paparan panas. Pada suhu ruang, PLA bersifat relatif rapuh, dengan ketahanan impak berkisar 13–20 kJ/m² untuk kristalinitas rendah dan 18–35 kJ/m² untuk kristalinitas tinggi. Sifat termal dan derajat kristalinitas PLA dipengaruhi oleh berat molekul, kondisi polimerisasi, riwayat termal, dan tingkat kemurnian material.



Gambar 2. PLA (Polylactic Acid)
Sumber : (IndiaMART, 2025)

Pati Kulit Singkong

Menurut Andi alfian & dewi wahyuningtyas., (2022) Kulit singkong mengandung pati dalam kisaran 20%–59%, yang menjadikannya bahan polimer alami yang baik sebagai bahan pengisi (*filler*) dalam pembuatan bioplastik untuk meningkatkan sifat mekanik bioplastik. Kandungan pati yang tinggi ini memungkinkan pembentukan matriks polimer yang homogen dan fleksibel, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik serta mempercepat proses biodegradasi bioplastik yang dihasilkan.



Gambar 3. Pati Kulit Singkong
Sumber : (Dokumentasi Pribadi)

TABEL 3. Karakteristik Fisik dan Mekanik *Edible Film* Berbasis Pati Kulit Singkong

Karakteristik	Nilai
Kadar Air	14,62%
Kadar Pati	73,29%
Kadar Amilosa	21,02%
Kadar Amilopektin	52,27%
Kadar HCN	7,01%
Nilai Kuat Tarik	0,08 – 0,37 Mpa
Tebal	0,09 – 0,17 mm
WVTR	0,26 – 0,39 g/m ² /hari
Elongasi	31,86 – 56,43 %
Titik Leleh	82 – 127 (°C)

Sumber : (Wasistha et al., 2021)

Menurut Wasistha et al., (2021), tepung kulit singkong memiliki kadar air 14,62% dan kandungan pati yang tinggi sebesar 73,29%, dengan komposisi amilosa 21,02% dan amilopektin 52,27%, yang mendukung pembentukan film bioplastik dengan kombinasi struktur padat dan fleksibel. Kadar HCN tercatat sebesar 7,01%, masih dalam batas yang dapat dikendalikan melalui proses pengolahan. Secara mekanik, bioplastik berbasis pati kulit singkong menunjukkan kuat tarik relatif rendah, yaitu 0,08–0,37 MPa, tetapi memiliki elongasi cukup tinggi sebesar 31,86–56,43%, yang menandakan sifat material yang lentur. Ketebalan film berada pada kisaran 0,09–0,17 mm, dengan nilai WVTR 0,26–0,39 g/m²/hari yang menunjukkan permeabilitas uap air cukup tinggi. Titik leleh bioplastik berada pada rentang 82–127 °C. Secara keseluruhan, pati kulit singkong berpotensi sebagai bahan baku bioplastik ramah lingkungan, tetapi memerlukan optimasi formulasi atau penambahan penguat untuk meningkatkan kekuatan tariknya.

Injection Molding

Proses *injection molding* merupakan proses yang paling banyak digunakan dalam memproduksi produk plastik. Proses injeksi dilakukan dengan memasukkan bahan baku berupa butiran-butiran plastik melalui *hopper* dan plastik akan di panaskan dalam *barrel*. Setelah plastik meleleh dengan temperatur tertentu, maka plastik tersebut didorong keluar dari dalam tabung melalui *nozzle* untuk diinjeksikan ke dalam cetakan (*mold*). Selanjutnya benda cetak dibiarkan membeku dan mendingin beberapa saat di dalam cetakan sebelum cetakan dilepas dan dibuka untuk mengeluarkan benda cetak. dan selanjutnya diinjeksikan ke dalam cetakan atau *mold*.

**Gambar 4.** Mesin *Injection Molding Pneumatic*
Sumber : (IndiaMART, 2025)

METODE

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi ekstrak tepung kulit singkong (pati) berwarna krem/putih serta PLA (*Polylactic Acid*) jenis NV dengan karakteristik tidak mengkilap (*doff*) dan berwarna putih, yang diperoleh dari toko *online*. Peralatan yang digunakan mencakup mesin *injection molding* untuk proses pencetakan spesimen, mesin penggiling biji-bijian (*Miller Machine* FGD-Z200) untuk pengolahan bahan, gelas *beaker* dan spatula *stainless steel* untuk proses pencampuran, serta timbangan digital dan jangka sorong untuk pengukuran massa dan dimensi spesimen. Pengujian sifat mekanik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan cetakan uji tarik standar ASTM D638 Tipe I. Selain itu, digunakan *cutter*, *box* penyimpanan, tanah persawahan sebagai media pengujian, serta alat pelindung diri berupa masker dan sarung tangan untuk menunjang keselamatan kerja selama penelitian.

Pembuatan Spesimen PLA+Tepung Kulit Singkong

Tahap berikutnya adalah formulasi dan pencampuran bahan sebagai langkah awal dalam pembuatan bioplastik. Bahan utama berupa *pellet* PLA ditimbang sesuai komposisi yang telah ditentukan, yaitu 70% PLA sebagai matriks polimer dan 30% tepung kulit singkong kering sebagai *filler* alami. Proses pencampuran diawali dengan menghaluskan PLA yang masih berupa butiran menggunakan *millar machine* (mesin penggiling) dengan kecepatan putar 28.000 rpm untuk memperoleh serbuk/bubuk PLA. Selanjutnya, kedua bahan diaduk dan dicampurkan menggunakan metode *melt intercalation*, di mana PLA dilelehkan dan dicampur bersama tepung kulit singkong pada suhu tertentu hingga mencapai kondisi homogen.

Campuran bahan yang telah homogen kemudian melalui proses pencetakan menggunakan mesin *injection molding*. Proses ini dilakukan pada tiga variasi suhu pemrosesan, yaitu 200°C, 225°C, dan 250°C. Pada tahap ini, campuran dilelehkan dan diinjeksikan ke dalam cetakan standar ASTM D638 Tipe I sehingga dihasilkan spesimen berbentuk *dog-bone* sesuai spesifikasi uji tarik. Setelah dicetak, spesimen dilepaskan dari cetakan yang telah didinginkan, diperiksa dimensi dan cacatnya,

kemudian dikondisikan pada suhu ruang dan dibersihkan dari sisa material.

Dalam penelitian ini, pembuatan spesimen dilakukan sebanyak tiga (3) kali untuk setiap variasi suhu pemrosesan guna memastikan konsistensi hasil, meningkatkan reliabilitas data, serta meminimalkan pengaruh kesalahan eksperimental.

Proses Injection Molding

Proses *injection molding* dilakukan untuk membentuk campuran PLA dan tepung kulit singkong menjadi spesimen standar ASTM D638 Tipe I. Campuran bahan dimasukkan melalui *hopper* ke *barrel* mesin yang dipanaskan pada suhu pemrosesan tertentu hingga meleleh secara homogen.. Mesin yang digunakan dalam proses pembuatan spesimen yaitu mesin *injection molding* tipe *pneumatic*. Tinggi mesin 69,4cm, dengan tinggi *injection* 15cm, 2 *heating injection*, dan mampu dioperasikan pada suhu tinggi hingga 350°C. Ilustrasi proses *injection molding* dapat dilihat pada gambar 5.



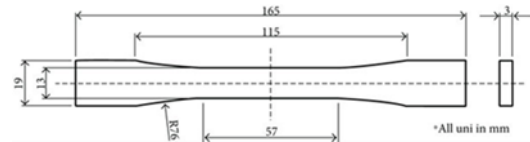
Gambar 5. Ilustrasi Proses Pencetakan

Metode Karakterisasi

Uji Tarik

Pengujian tarik digunakan untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara lambat. Pengujian tarik adalah dasar dari pengujian mekanik yang dipergunakan pada material. Untuk melakukan pengujian ini diperlukan alat khusus, salah satunya adalah *Universal Testing Machine* (UTM). Melalui uji ini diperoleh data yang sangat krusial bagi rekayasa teknik, antara lain kekuatan tarik maksimum (*Tensile Strength*), modulus elastisitas (*Young's modulus*), regangan putus (*elongation at break*).

Pengujian tarik plastik dan bioplastik dalam penelitian ini mengacu pada standar ASTM D638 yang mengatur prosedur, peralatan, kecepatan tarik, serta bentuk dan dimensi spesimen uji. Standar ini menyediakan beberapa tipe spesimen, di mana Tipe I umum digunakan untuk material tipis dengan ketebalan hingga ± 3 mm. Spesimen ASTM D638 Tipe I berbentuk *dog-bone* dengan panjang total sekitar 165 mm, lebar bagian tengah ± 13 mm, dan panjang *gauge* 57 mm, sehingga memungkinkan distribusi tegangan yang merata dan kegagalan terjadi pada daerah uji. Penggunaan standar ini menghasilkan pengukuran sifat tarik yang lebih representatif untuk material bioplastik hasil pencetakan atau lembaran tipis. Ilustrasi bentuk spesimen dapat dilihat pada gambar 6



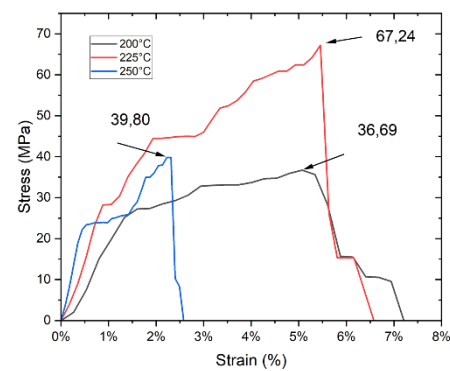
Gambar 6. Spesimen Uji Tarik Standar ASTM D638 Tipe I

Sumber : (ASTM D638, 2023)

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 DAN PEMBAHASAN

Hasil uji kuat tarik bioplastik berbasis PLA dan pati kulit singkong dengan variasi suhu (200°C, 225°C, 250°C) dapat disajikan pada gambar 7 dalam bentuk grafik tegangan-regangan.



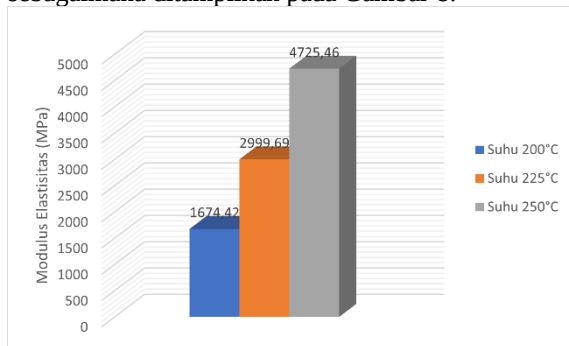
Gambar 7. Grafik Tgeangan Regangan Bioplastik PLA-Tepung Kulit Singkong

Gambar 7 menunjukkan kurva hubungan antara nilai *strain* (%) terhadap *tensile strength* (MPa) dari bioplastik berbasis *polylactic acid* (PLA) dan tepung kulit singkong yang diproses pada tiga variasi suhu, yaitu 200 °C, 225 °C, dan 250 °C. Terlihat bahwa suhu pemrosesan memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik material. Spesimen pada suhu 200 °C (Garis Hitam) menunjukkan kekuatan tarik maksimum sebesar 36,69 MPa, tetapi dengan regangan tertinggi hingga 7%, yang mengindikasikan elastisitas yang lebih tinggi tetapi kekuatan struktur yang lebih rendah dibandingkan pada suhu optimum. Spesimen yang diproses pada suhu 225 °C (Garis Merah) menghasilkan kekuatan tarik maksimum tertinggi sebesar 67,24 MPa pada regangan sekitar 6%, mengindikasikan bahwa suhu ini merupakan suhu optimum untuk pencampuran dan pembentukan struktur molekul yang kuat dan seragam antara PLA dan komponen lignoselulosa dari kulit singkong. Sebaliknya, pada suhu 250 °C (Garis Biru), kekuatan tarik maksimum hanya mencapai 39,80 MPa dan menunjukkan keruntuhan dini pada regangan sekitar 2,8%.

Hal ini menunjukkan bahwa suhu tinggi dapat menyebabkan degradasi termal pada PLA maupun

komponen biomaterial lainnya, yang menurunkan ikatan antarmolekul dan mengakibatkan retakan mikro pada struktur bioplastik. Hal ini sejalan dengan studi Widyaningrum et al., (2020), yang menyatakan bahwa suhu tinggi dan lama pengeringan yang tidak tepat dapat menyebabkan penurunan kekuatan akibat pengerasan berlebihan dan perubahan struktur polimer.

Selain itu, Goutianos & Beauson, (2023) menyatakan bahwa variasi suhu pemrosesan juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap modulus elastisitas bioplastik. Modulus elastisitas adalah ukuran kekakuan material yang menunjukkan seberapa besar deformasi elastis yang terjadi akibat pembebanan; semakin besar modulusnya, semakin kaku material tersebut dan semakin kecil regangan elastis yang terjadi (Setiawan et al., 2018). sebagaimana ditampilkan pada Gambar 8.

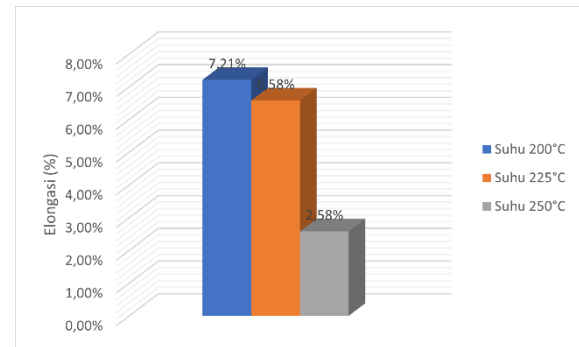


Gambar 8. Grafik Modulus Elastisitas Bioplastik PLA-Tepung Kulit Singkong

Berdasarkan Gambar 8, peningkatan suhu pemrosesan berpengaruh nyata terhadap kekakuan bioplastik PLA–tepung kulit singkong. Pada suhu 200 °C, modulus elastisitas sebesar 1674,42 MPa menunjukkan kekakuan yang masih rendah akibat interaksi antarfasa yang belum optimal sehingga interaksi antar molekul polimer masih lemah (Ineke Velghe, Bart Buffel, Veerle Vandeginste, Wim Thielemans, 2023). Ketika suhu dinaikkan ke 225 °C, terjadi peningkatan hingga mencapai 2999,69 MPa, menunjukkan bahwa pada suhu ini terjadi peningkatan mobilitas rantai polimer yang memperkuat pembentukan struktur semi-kristalin. Peningkatan suhu menyebabkan dispersi dan kompatibilitas antara PLA dan tepung kulit singkong meningkat, yang berkontribusi pada kekakuan yang lebih tinggi (Goutianos & Beauson, 2023).

Pada suhu 250 °C, modulus elastisitas mencapai nilai tertinggi sebesar 4725,46 MPa, menandakan terbentuknya struktur yang sangat kaku akibat kristalisasi lanjutan dan penguatan ikatan antarmolekul (Mokhena et al., n.d.). Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian suhu pemrosesan berperan penting dalam meningkatkan sifat mekanik bioplastik berbasis PLA dan biomassa. Selanjutnya, pengaruh suhu pemrosesan terhadap fleksibilitas

material dianalisis melalui nilai elongasi putus yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Elongasi Bioplastik PLA-Tepung Kulit Singkong

Berdasarkan Gambar 9, nilai elongasi bioplastik PLA–tepung kulit singkong menurun seiring peningkatan suhu pemrosesan dari 200 °C hingga 250 °C. Pada suhu 200 °C, elongasi tertinggi sebesar 7,21% menunjukkan kelenturan material yang optimal karena struktur PLA masih stabil dan interaksi matriks–filler berlangsung baik sehingga mampu menahan deformasi sebelum putus (Wang et al., 2021). Ketika suhu dinaikkan menjadi 225 °C, elongasi menurun menjadi 6,58% akibat berkurangnya fleksibilitas material yang dipengaruhi peningkatan kristalinitas dan awal degradasi termal. Penurunan paling signifikan terjadi pada suhu 250 °C dengan nilai elongasi 2,58%, yang mengindikasikan degradasi termal lanjut, melemahnya interaksi antarfasa, serta terbentuknya cacat mikro yang menyebabkan material menjadi lebih getas (Ridwan, Teuku Hidayat, Awanis Ilmi, 2022)..

Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Patti et al., (2020) yang menyatakan bahwa suhu pemrosesan tinggi dapat mempercepat pemutusan rantai polimer (*chain scission*), menyebabkan berkurangnya sifat elastis dan meningkatnya kekakuan. Selain itu, (Wang et al., (2021) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan peningkatan kristalinitas tetapi berdampak negatif terhadap elongasi, karena material menjadi lebih getas. Oleh karena itu, suhu pemrosesan optimal untuk menjaga sifat elastis bioplastik berada di bawah 230 °C.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa variasi suhu pemrosesan berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik bioplastik berbasis PLA dan tepung kulit singkong. Peningkatan suhu pemrosesan dari 200 °C ke 225 °C menyebabkan kenaikan nilai kekuatan tarik secara signifikan, dengan nilai optimum dicapai pada suhu 225 °C sebesar $\pm 66,99$ MPa. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu tersebut terjadi pencampuran yang lebih homogen serta interaksi antarmolekul yang optimal antara matriks PLA dan *filler* tepung kulit singkong. Namun,

pada suhu 250 °C terjadi penurunan kekuatan tarik akibat degradasi termal rantai polimer PLA, yang menyebabkan material menjadi lebih rapuh meskipun memiliki tingkat kekakuan yang lebih tinggi.

REFERENSI

- [1.] Adina Widi Astuti, Agus Yulianto, U. N. (2021). *The effect of drying temperature on the characteristics of biodegradable plastic from cassava pulp and chitosan*.
- [2.] Ahmad Wira Wasistha, Muhammad Reza Sukma Dika, Annisa' Sakina Aulia, Norazkya Mutiara Samudra, D. N. P. (2021). *View of PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF EDIBLE FILM BASED ON CASSAVA PEEL STARCH.pdf*.
- [3.] Andi Alfian, Dewi Wahyuningtyas, P. D. S. (2022). *PEMBUATAN EDIBLE FILMDARI PATI KULIT SINGKONG MENGGUNAKAN PLASTICIZER SORBITOL DENGAN ASAM SITRAT*. August.
- [4.] Bajpai, P. K., Singh, I., & Madaan, J. (2022). Development and characterization of PLA-based green composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(1), 52–81. <https://doi.org/10.1177/0892705712439571>
- [5.] Chinaglia, S., Esposito, E., Tosin, M., Pecchiari, M., & Degli Innocenti, F. (2024). Biodegradation of plastics in soil: The effect of water content. *Polymer Degradation and Stability*, 222, 110691. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdeg.2024.110691>
- [6.] D638, A. (2023). *Tensile test specimen geometry according to ASTM D638 Type IV; DMA specimen geometry (figure)*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/352017894/figure/fig5/AS:1029756904558595@1622524586987/a-Tensile-test-specimen-geometry-according-to-ASTM-D638-Type-IV-b-DMA-specimen-geometry.png>
- [7.] Dmitruk, A., Ludwiczak, J., Skwarski, M., & Makula, P. (2023). *biopolymers Influence of PBS , PBAT and TPS content on tensile and processing properties of PLA-based polymeric blends at different temperatures*. 1991–2004. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-08081-z>
- [8.] Fadzil, N. F., & Othman, S. A. (2021). *Implementation of Nanofiller for Bioplastic Reinforcement : A Review*. May.
- [9.] Fauzi, M. A. (2023). *Identifikasi Mikroplastik Udara dan PM 2.5 pada Sentra Industri Tahu Desa Tropodo Kecamatan Krian Kabupaten Sidoarjo*. 3, 747–757.
- [10.] Goutianos, S., & Beauson, J. (2023). The Influence of Processing Temperature on the Tensile Properties of Melt - Spun PLA Fibres and their Self - Reinforced Composites. *Applied Composite Materials*, 30(6), 1865–1882. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10153-5>
- [11.] Illing, I., & MB, S. (2022). *Uji ketahanan air bioplastik dari limbah ampas sagu dengan penambahan variasi konsentrasi gelatin*. 182–189.
- [12.] Ineke Velghe, Bart Buffel, Veerle Vandeginste, Wim Thielemans, F. D. (2023). *Riview on the degradation of Poly(lactid acid) during Melt Processing*.
- [13.] 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>
- [14.] Laura, M., & Lorenzo, D. (2020). *Industrial Applications of Poly (lactic acid)*.
- [15.] Liang, Y., Tan, Q., Song, Q., & Li, J. (2021). An analysis of the plastic waste trade and management in Asia. *Waste Management*, 119, 242–253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.049>
- [16.] Made, D., Pradana, D., Harsojuwono, B. A., Hartiati, A., Pertanian, F. T., Udayana, U., & Bukit, K. (2019). *STUDI SUHU DAN pH GELATINISASI PADA PEMBUATAN*. 7(3), 441–449.
- [17.] Mokhena, T. C., Sefadi, J. S., Sadiku, E. R., John, M. J., & Mochane, M. J. (n.d.). *Thermoplastic Processing of PLA / Cellulose Nanomaterials Composites*. <https://doi.org/10.3390/polym10121363>
- [18.] Mukhlisien, M., Suhendrayatna Suhendrayatna, Montazeri, M., & Amar, H. (2021). Kajian Pembuatan Film Plastik Biodegradable Dari Ekstrak Bonggol Jagung. *Jurnal Inovasi Ramah Lingkungan (JIRL)*, 2(1), 5–19.
- [19.] Negrete-bolagay, D., & Guerrero, V. H. (2024). *Opportunities and Challenges in the Application of Bioplastics : Perspectives from Formulation , Processing , and Performance*.
- [20.] Ni Made Heni Epriyanti, Bambang Admadi Harsojuwono, I. W. A. (2016). *Email koresponden*: 4(1), 21–30.
- [21.] Pantani, R., Volpe, V., & Titomanlio, G. (2014). Foam injection molding of poly(lactic acid) with

- environmentally friendly physical blowing agents. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 3098–3107. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprot.2014.07.002>
- [22.] Parera, Y., & Gusriani, I. (2021). *The Effect of Starch Concentration on the Characteristics of Modified Purple Yam Starch Using the Precipitation Method*. 1(2), 29–38.
- [23.] Patti, A., Acierno, D., Latteri, A., Tosto, C., Pergolizzi, E., Recca, G., Cristaudo, M., & Cicala, G. (2020). Influence of the processing conditions on the mechanical performance of sustainable bio-based PLA compounds. *Polymers*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/POLYM12102197>
- [24.] Ranakoti, L., Gangil, B., Misha, S. K., Singh, T., Sharma, S., A., I. R., & El-khatib, S. (2022). Critical Review on Polylactic Acid : Properties , Structure. *Materials*, 15(4312), 1–29.
- [25.] Ridwan, Teuku Hidayat, Awanis Ilmi, N. A. (2022). *Jurnal Reaksi (Journal of Science and Technology) Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Lhokseumawe Vol. 20 No.02, Desember 2022 ISSN 1693-248X*. 20(02), 1–9.
- [26.] Setiawan, F., Ardianto, H., & Dirgantara, T. (2018). KARAKTERISTIK SIFAT MEKANIS KEKUATAN TARIK KOMPOSIT NANO. 5(2), 30–44.
- [27.] Suryani, Rihayat, T., Fitria, & Safitri, A. (2022). PEMBUATAN BIOPLASTIK RAMAH LINGKUNGAN BERBASIS PLA-PCL DENGAN COMPOSITE CATECHIN DAN KITOSAN SEBAGAI BAHAN BARU PENGANTI PLASTIK BERBASIS PETROLEUM Suryani* 1 , Teuku Rihayat 1 , Fitria 2 , Aida Safitri 3. 20(02), 1–6.
- [28.] Tedeschi, G., Morales, Y., Fern, D., & Guzman-puyol, S. (2023). *Food Hydrocolloids Plasticized , greaseproof chitin bioplastics with high transparency and biodegradability*. 145(July). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109072>
- [29.] andiar, A., Patel, B., Sahu, S. K., Yadav, V. K., Patel, R., Sahoo, D. K., Joshi, M., & Patel, A. (2025). Potato starch bioplastic films reinforced with organic and inorganic fillers: A sustainable packaging alternative. *International Journal of Biological Macromolecules*, 306, 141630. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141630>
- [30.] Tubagus Achmad Faqih, F. F. (2022). *PLASTIC BAG DIET AS A FORM OF ENVIRONMENTAL CONCERNS DIET KANTONG PLASTIK SEBAGAI BENTUK KEPEDULIAN TERHADAP LINGKUNGAN Prodi Ilmu Al- Qur ' an dan Tafsir , Fakultas Syariah dan Hukum , Universitas Sains Al - Qur ' an Prodi Pendidikan Fisika , Fakultas Il. 6(2)*.
- [31.] Wang, S., Liu, B., Qin, Y., & Guo, H. (2021). *Effects of Processing Conditions and Plasticizing-Reinforcing Modification on the Crystallization and Physical Properties of PLA Films*.
- [32.] Wibowo, M. D., Prathiwi, P., Putri, K., Hanif, M. F., Yuliaty, F., Studi, P., Manajemen, M., Sarjana, D. P., & Buana, U. S. (2024). *KEMAJUAN TERKINI DALAM PENGEMASAN BIODEGRADABLE : PENGGUNAAN KEMASAN BERBASIS POLY (LACTIC-ACID) – TINJAUAN SISTEMATIS*. 1, 138–146.
- [33.] Widyaningrum, B. A., Kusumaningrum, W. B., Syamani, F. A., Pramasari, D. A., Kusuma, S. S., Akbar, F., Ermawati, R., & Cahyaningtyas, A. A. (2020). Karakteristik Sifat Mekanik Bioplastik Pati Singkong/Pva Dengan Penambahan Pulp Tandan Kosong Kelapa Sawit Dan Asam Sitrat Teraktivasi. *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, 42(2), 46. <https://doi.org/10.24817/jkk.v42i2.6130>
- [34.] Wijayanti, K. P., Dermawan, N., Faisah, S. N., Prayogi, V., Judiawan, W., Nugraha, T., & Listyorini, N. T. (2016). Bio-Degradeable Bioplastics Sebagai Plastik Ramah Lingkungan. *Surya Octagon Interdisciplinary Journal of Technology*, 1(2), 131–153.