

Analisis Uji Tarik Bioplastik PLA–Tepung Kulit Pisang pada Variasi Suhu Pemrosesan *Injection Molding*

Adimashqi Maulana^{1*}, Andita Nataria Fitri Ganda², Dewi Puspitasari³, Isa Yuanata Abdullah⁴

^{1,2,3,4}Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231

E-mail: *adimashqimaulana.22003@mhs.unesa.ac.id

Abstrak: Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi suhu pemrosesan *injection molding* terhadap sifat mekanik bioplastik berbasis *polylactic acid* (PLA) yang diperkuat dengan tepung kulit pisang. Material diproses pada tiga suhu berbeda (200°C, 225°C, 250°C) dengan komposisi 70% PLA–30% tepung kulit pisang. Pengujian tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) sesuai standar ASTM D638 Type I untuk mengukur kekuatan tarik (*tensile strength*) dan modulus elastisitas. Hasil menunjukkan bahwa suhu 225°C menghasilkan kekuatan tarik tertinggi 50,96 MPa dan modulus elastisitas 49,96 MPa, jauh melampaui suhu 200°C menghasilkan kekuatan tarik 27,09 MPa dan modulus elastisitas 21,99 MPa, Begitu juga pada suhu 250°C menghasilkan kekuatan tarik 35,97 MPa dan modulus elastisitas 30,40 MPa. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa terdapat suhu optimum 225°C yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara homogenitas struktur material dan ikatan antarmuka matriks–*filler*, sehingga bioplastik PLA–tepung kulit pisang berpotensi sebagai pengganti plastik konvensional dengan sifat mekanik yang kompetitif.

Kata kunci: Bioplastik, *Injection Molding*, *Polylactic Acid*, Sifat Mekanik, Tepung Kulit Pisang.

Abstract: This study analyzes the effect of injection molding processing temperature variation on mechanical properties of bioplastic based on polylactic acid (PLA) reinforced with banana peel flour. Material was processed at three different temperatures (200°C, 225°C, 250°C) with 70% PLA–30% banana peel flour composition. Tensile testing was performed using Universal Testing Machine (UTM) according to ASTM D638 Type I standard to measure tensile strength and elastic modulus. Results showed that 225°C produced the highest tensile strength of 50.96 MPa and elastic modulus of 49.96 MPa, significantly higher than 200°C (27.09 MPa; 21.99 MPa) and 250°C (35.97 MPa; 30.40 MPa). This research confirms that there is an optimum temperature of 225°C that produces the best balance between material structure homogeneity and matrix–filler interfacial bonding, making PLA–banana peel flour bioplastic potentially suitable as a conventional plastic substitute with competitive mechanical properties.

Keywords: Bioplastic, Banana peel flour, Injection Molding, Mechanical Properties, Polylactic Acid

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

PENDAHULUAN

Lonjakan produksi plastik global terus berlanjut dari tahun ke tahun, sementara kapasitas pengelolaan dan daur ulang masih tertinggal jauh di belakang. Berbagai studi melaporkan bahwa hanya sekitar 9% dari total plastik yang beredar yang benar-benar berhasil didaur ulang, sedangkan sisanya berakhir sebagai timbunan sampah di darat maupun di laut dan mengalami fragmentasi menjadi mikroplastik yang tersebar di rantai makanan. Akumulasi ini tidak hanya mencemari tanah, air, dan udara, tetapi juga memicu gangguan ekosistem, menurunkan kualitas kesehatan manusia, dan menambah beban emisi gas rumah kaca akibat proses pengolahan dan pembakarannya [1].

Plastik konvensional seperti *polietilena* dan *polipropilena* banyak digunakan karena ringan, murah, dan memiliki sifat mekanik yang baik, tetapi karakteristiknya yang sangat sulit terurai dengan waktu degradasi yang bisa mencapai ratusan tahun menjadikan material ini sumber pencemaran jangka panjang yang sulit dikendalikan tanpa adanya

alternatif material yang lebih berkelanjutan. [2].

Dalam konteks tersebut, bioplastik muncul sebagai salah satu solusi material yang menjanjikan karena dibuat dari sumber daya terbarukan dan dirancang dapat terurai secara alami di lingkungan tertentu. Di antara berbagai jenis bioplastik, *Polylactic Acid* (PLA) menjadi kandidat utama karena dapat diproduksi dari biomassa seperti pati jagung, tebu, atau singkong melalui proses fermentasi dan polimerisasi, serta kompatibel dengan teknologi pemrosesan polimer modern seperti *extrusion*, *injection molding*, *thermoforming*, hingga *3D printing* [3]. PLA dikenal memiliki sifat transparan, mudah dibentuk, dan bersifat *biodegradable* serta kompostabel pada kondisi tertentu, sehingga banyak dimanfaatkan untuk kemasan makanan, produk sekali pakai, hingga aplikasi medis. Meski demikian, PLA murni cenderung rapuh, sensitif terhadap kelembapan, dan memiliki laju kristalisasi yang lambat, sehingga kekuatan impact dan fleksibilitasnya masih di bawah

plastik berbasis minyak bumi; hal ini mendorong berbagai upaya rekayasa material melalui penambahan *plasticizer*, *compatibilizer*, dan *filler* alami untuk meningkatkan kombinasi kekuatan, kekakuan, dan keuletannya [4].

Salah satu pendekatan yang semakin banyak dikaji adalah pemanfaatan limbah pertanian sebagai *filler* dalam matriks PLA, dengan kulit pisang sebagai kandidat menarik karena ketersediaannya yang melimpah terutama di negara tropis seperti Indonesia. Indonesia yang merupakan salah satu produsen pisang terbesar dunia menghasilkan tonase limbah kulit pisang yang besar setiap tahun, yang umumnya hanya dibuang begitu saja dan berpotensi menimbulkan masalah lingkungan jika tidak dikelola [5]. Kulit pisang mengandung pati, selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dapat berfungsi sebagai penguat alami (natural *fiber/filler*) ketika dicampurkan ke dalam matriks polimer, sehingga berpotensi meningkatkan kekakuan dan kekuatan tarik sekaligus mempercepat biodegradasi komposit PLA karena kandungan organiknya mudah diserang mikroorganisme. Dengan demikian, integrasi PLA dan tepung kulit pisang bukan hanya menawarkan material biokomposit yang lebih ramah lingkungan, tetapi juga mendukung konsep *circular economy* melalui pemanfaatan limbah organik menjadi produk bernilai tambah [6].

Pemanfaatan limbah kulit pisang sebagai *filler* menarik perhatian karena Indonesia adalah produsen pisang terbesar dunia dengan limbah kulit pisang yang melimpah. Kulit pisang kaya akan pati, selulosa, dan lignin yang berpotensi memperkuat sifat mekanik PLA dan sekaligus memanfaatkan limbah pertanian secara berkelanjutan [7]. Penelitian terdahulu sebagian besar menggunakan metode *casting* dengan kontrol suhu terbatas, penelitian ini menggunakan *injection molding metode* yang lebih representatif untuk aplikasi industri karena menghasilkan produk dengan sifat konsisten dan bentuk kompleks. Fokus spesifik pada pengaruh variasi suhu pemrosesan terhadap kekuatan tarik dan modulus elastisitas menjadi determinan utama keberhasilan menghasilkan bioplastik berkualitas tinggi yang mampu bersaing dengan plastik konvensional [8].

DASAR TEORI

Bioplastik

Bioplastik adalah material polimer yang berasal dari sumber daya terbarukan, seperti pati tanaman atau hasil fermentasi mikroorganisme. Bioplastik dapat dikategorikan menjadi dua kelompok utama: plastik berbasis biomassa (*bio-based*) yang bahan bakunya diperoleh dari sumber daya alam terbarukan, dan plastik *biodegradable* yang dapat terurai secara alami dalam waktu tertentu. Keunggulan utama bioplastik dibanding plastik konvensional adalah sifatnya yang ramah lingkungan, meskipun biaya produksi relatif tinggi dan proses pembuatan lebih kompleks [9].



Gambar 1. Bioplastik
Sumber : [10].

Kulit Pisang sebagai *Filler* Bioplastik

Kulit pisang mengandung pati, selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berfungsi sebagai penguat alami (natural *filler*). Produksi pisang dunia mencapai lebih dari 120 juta ton per tahun, di mana 30–40% merupakan kulit yang biasanya dibuang sebagai limbah *organic*. Jika tidak dikelola, limbah ini menimbulkan masalah lingkungan seperti pencemaran bau dan peningkatan emisi gas rumah kaca akibat pembusukan. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan 10% tepung kulit pisang ke dalam PLA dapat meningkatkan kekuatan tarik hingga 30% [8]. Namun, ukuran partikel *filler* dan distribusinya sangat memengaruhi homogenitas campuran dan sifat akhir material. Ukuran partikel yang terlalu besar atau kadar *filler* yang berlebihan dapat menyebabkan aglomerasi partikel, menghasilkan konsentrasi tegangan lokal dan membuat material lebih rapuh [11].



Gambar 2. Filler Kulit Pisang
Sumber: Pribadi

Polylactic Acid (PLA)

Polylactic Acid merupakan poliester alifatik yang diperoleh melalui proses polimerisasi asam laktat, di mana asam laktat dapat disintesis dari hasil fermentasi karbohidrat yang berasal dari sumber daya terbarukan seperti pati jagung, singkong, atau tebu. PLA tipe NVIngeo (*NatureWorks*) memiliki massa jenis sekitar 1,24 g/cm³, suhu transisi kaca (T_g) 55–60°C, dan titik leleh (T_m) 165–180°C, menjadikannya cocok untuk proses termoplastik seperti *injection molding* dan *extrusion* [12]. Kekuatan tarik rata-rata PLA sekitar 50 MPa dan modulus elastisitas tinggi menjadikannya ideal untuk aplikasi struktural. Keunggulan lain dari PLA adalah sifatnya yang dapat terurai (*biodegradable*) dalam kondisi tertentu. Namun, PLA juga memiliki keterbatasan berupa sifat rapuh dengan elongasi putus rendah, sehingga kurang fleksibel, serta rentan mengalami degradasi termal ketika diproses pada suhu 200°C [13].

Injection Molding

Injection molding adalah metode pemrosesan polimer yang meleburkan material termoplastik dan menyuntikkannya ke dalam cetakan tertutup. Metode

ini tidak hanya memberikan presisi bentuk dan efisiensi produksi, tetapi juga memungkinkan kontrol parameter penting, khususnya suhu. Untuk pemrosesan bioplastik PLA, *injection molding* memberikan keunggulan berupa distribusi *filler* yang lebih homogen, sifat mekanik yang stabil, dan kesesuaian dengan produksi skala industri [14].

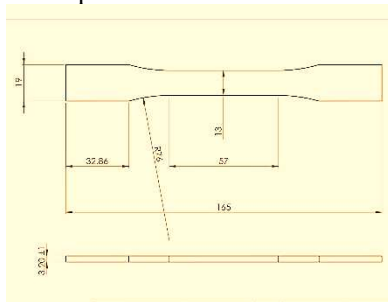


Gambar 3. *Pneumatic Injection Molding*
Sumber: [15].

Variasi suhu pemrosesan berperan kritis dalam mengoptimalkan seluruh proses *injection molding*. Suhu yang terlalu rendah menyebabkan viskositas material tetap tinggi sehingga aliran ke rongga cetakan tidak sempurna, mengakibatkan kekosongan, dimensi tidak presisi, dan kekuatan mekanik menurun signifikan. Sebaliknya, suhu terlalu tinggi dapat mempercepat degradasi termal PLA melalui pemutusan rantai polimer (*chain scission*), menurunkan berat molekul rata-rata, menimbulkan perubahan warna, dan mengurangi karakteristik material [16]. Suhu optimum 225°C memastikan homogenitas pencampuran PLA dan tepung kulit pisang, pengisian cetakan maksimal, serta pengembangan struktur kristalin yang mendukung kekuatan mekanik bioplastik sesuai kebutuhan aplikasi [17].

Uji Tarik

Uji tarik bertujuan untuk mengukur kekuatan mekanik bioplastik yang dihasilkan, dengan cara menentukan seberapa kuat bioplastik dapat menahan beban sebelum pecah.



Gambar 4. Spesimen ASTM D638 Tipe I
Sumber: [18].

Sampel bioplastik yang telah dibentuk dipotong sesuai dengan standar ukuran uji tarik ASTM D638 Tipe I meliputi panjang total 165 mm, panjang *gauge section* 50 mm, panjang bagian sempit 57 mm, lebar bagian sempit 13 mm, lebar bagian grip 19 mm, serta radius transisi 76 mm dengan ketebalan standar 3,2 mm seperti pada gambar 4, kemudian diuji menggunakan mesin uji tarik (*Universal Testing Machine*) dengan kecepatan pemuatan yang terkontrol [4]. Parameter utama yang diukur meliputi :

Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*)

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (1)$$

di mana F_{max} adalah beban maksimum (N) dan A_0 adalah luas penampang awal (mm²). Nilai ini menunjukkan ketahanan material terhadap pembebanan tarik hingga putus.

Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L_0}} \quad (2)$$

di mana adalah regangan elastik. Modulus elastisitas mengukur kekakuan material dan kemampuannya untuk kembali ke bentuk semula setelah diberi beban.

Elongasi

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (3)$$

di mana ΔL adalah pertambahan panjang spesimen pada saat putus dan L_0 adalah panjang awal bagian terukur (*gauge length*) sebelum diberi beban tarik.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pemrosesan menggunakan metode *injection molding* terhadap sifat mekanik dan biodegradabilitas bioplastik berbasis *Polylactic Acid* (PLA) dengan penambahan tepung kulit pisang sebagai *filler*. Melalui penelitian ini, peneliti dapat secara langsung mengontrol dan memanipulasi variabel bebas untuk melihat pengaruhnya terhadap variabel terikat, sehingga bisa mendapatkan temuan yang valid dan reliabel [19].

Formulasi Material

Proses sintesis bioplastik PLA-tepung kulit pisang dimulai dengan persiapan bahan baku, di mana tepung kulit pisang dikeringkan pada suhu 60-80°C hingga kadar air rendah, kemudian dihaluskan dan diayak untuk mendapatkan ukuran partikel seragam, sementara PLA tipe NV *Inge NatureWorks* ditimbang dengan rasio 70% PLA sebagai matriks utama dan 30% tepung kulit pisang sebagai *filler* [20]. Campuran bahan dihomogenkan menggunakan *dry mixer* berkecepatan rendah untuk memastikan distribusi *filler* yang merata dalam matriks PLA dan mencegah aglomerasi partikel. Selanjutnya, campuran dimasukkan ke dalam barrel mesin *injection molding* pneumatik, dilebur, dan disuntikkan ke dalam cetakan standar ASTM D638 *Type I* dengan tekanan 5-6 bar pada variasi suhu pemrosesan 200°C, 225°C, dan 250°C guna menganalisis pengaruh suhu terhadap sifat mekanik dan biodegradabilitas. Setelah proses injeksi selesai, sampel didinginkan, dikeluarkan dari cetakan, dan dikondisikan pada suhu ruang untuk menghilangkan tegangan internal serta memastikan dimensi stabil sebelum dilanjutkan ke tahap pengujian [21].



Gambar 5. Proses Sintesis Bioplastik
Sumber: Pribadi

Uji Tarik

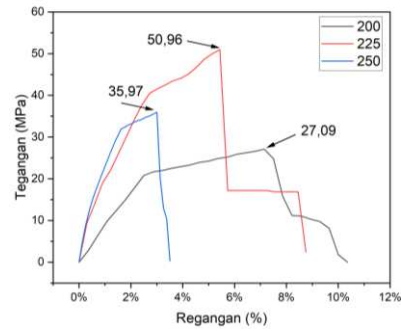
Proses uji tarik dilakukan untuk mengukur kekuatan tarik dan modulus elastisitas bioplastik PLA-tepung kulit pisang sesuai standar ASTM D638 Type I. Sampel berbentuk *dog-bone* dengan dimensi panjang total 165 mm, panjang *gauge section* 50 mm, lebar bagian sempit 13 mm, lebar grip 19 mm, dan ketebalan 3,2 mm dipasang pada *Universal Testing Machine* (UTM) yang telah dikalibrasi. Pengujian dilakukan dengan memberikan gaya tarik aksial secara bertahap pada kecepatan *crosshead* 5 mm/menit hingga spesimen patah, di mana data gaya dan *displacement* direkam secara otomatis untuk menghasilkan kurva tegangan-regangan [4].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada uji tarik, tegangan mengukur gaya yang diterapkan pada material per satuan luas penampang, sedangkan regangan mengukur perubahan panjang relatif dari material saat diberi beban. Kekuatan tarik atau tegangan maksimum menunjukkan sejauh mana bioplastik dapat menahan beban sebelum putus, sementara elongasi (regangan) menunjukkan seberapa banyak bioplastik dapat meregang sebelum pecah. Modulus elastisitas (*Young's modulus*) dihitung dari kemiringan garis lurus pada kurva tegangan-regangan di daerah elastis, yang menggambarkan kekakuan material atau tingkat resistensi terhadap deformasi elastis saat diberi tegangan [22].

Tegangan-Regangan

Grafik kurva tegangan-regangan pada gambar 6 menunjukkan perilaku mekanik bioplastik PLA-tepung kulit pisang pada variasi suhu pemrosesan *injection molding* 200°C, 225°C, dan 250°C, dengan tiga replikasi per kondisi.

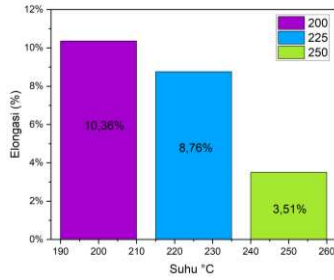


Gambar 6. Kurva Tegangan-Regangan
Sumber: Pribadi

Kurva suhu 225°C (garis merah) memiliki tegangan maksimum tertinggi sekitar 50,96 MPa pada regangan 5-6%, menandakan kekuatan tarik dan modulus elastisitas optimal akibat viskositas lelehan ideal yang memungkinkan pengisian cetakan sempurna, dispersi *filler* homogen, serta kristalinitas PLA seimbang untuk transfer beban efektif antar matriks dan *filler* [23]. Sebaliknya, kurva suhu 200°C (garis hitam) mencapai tegangan maksimum rendah 27,09 MPa pada regangan lebih tinggi 7-8% dengan gradien awal landai, disebabkan viskositas tinggi menghambat aliran material sehingga pengisian cetakan tidak sempurna, distribusi tepung kulit pisang tidak merata, dan kristalinitas rendah menghasilkan struktur berpori dengan ikatan antarmuka lemah [24]. Pada suhu 250°C (garis biru), kurva naik curam tapi puncak tegangan hanya 35,97 MPa pada regangan rendah 3-4% diikuti penurunan tajam, menunjukkan material rapuh karena degradasi termal PLA (*chain scission*), pelepasan oligomer volatil, dan kerusakan *filler* organik meskipun kristalinitas meningkat [25]. Pola ini mengonfirmasi suhu 225°C sebagai kondisi optimum dengan keseimbangan kekuatan dan kekakuan, sementara suhu ekstrem (rendah/tinggi) menurunkan performa akibat cacat proses seperti *short shot* atau degradasi termal. Hasil replikasi menunjukkan variasi minimal, memvalidasi konsistensi eksperimen.

Elongasi

Grafik elongasi putus pada gambar 7 menunjukkan perilaku deformasi bioplastik PLA-tepung kulit pisang pada variasi suhu pemrosesan *injection molding*, dengan nilai tertinggi 10,38% pada suhu 200°C (ungu), 8,76% pada 225°C (biru), dan terendah 3,51% pada 250°C (hijau).

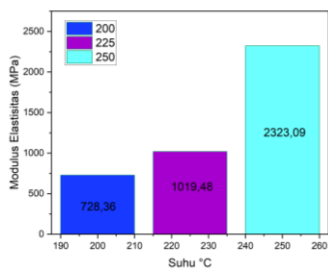


Gambar 7. Grafik Batang Elongasi
Sumber: Pribadi

Elongasi tinggi pada suhu 200°C disebabkan viskositas lelehan PLA yang masih tinggi menghasilkan struktur amorf dengan kristalinitas rendah dan pengisian cetakan tidak sempurna, sehingga material lebih ulet dengan kemampuan deformasi plastis lebih besar sebelum patah akibat ikatan antarmuka PLA-*filler* yang lemah dan pori-pori mikro [26]. Suhu 225°C menghasilkan elongasi sedang 8,76% karena viskositas optimal memungkinkan dispersi *filler* homogen dan kristalinitas seimbang, di mana material tetap fleksibel tetapi kekuatan tarik tinggi (50,96 MPa) menunjukkan keseimbangan *ductility-strength* [27]. Penurunan drastis elongasi pada 250°C (3,51%) terjadi akibat degradasi termal PLA yang menyebabkan *chain scission*, kristalinitas berlebihan, dan kerusakan *filler* lignoselulosa sehingga material menjadi rapuh *brittle* dengan deformasi minimal sebelum kegagalan [28]. Pola ini konsisten dengan kurva tegangan-regangan sebelumnya, mengonfirmasi *trade-off* klasik antara kekuatan dan kelenturan dipengaruhi suhu pemrosesan.

Modulus Elastisitas

Grafik menunjukkan bahwa modulus elastisitas bioplastik PLA-tepung kulit pisang meningkat seiring kenaikan suhu pemrosesan *injection molding*, masing-masing 728,36 MPa pada 200°C, 1.019,48 MPa pada 225°C, dan 2.323,09 MPa pada 250°C.



Gambar 8. Grafik Batang Modulus Elastisitas
Sumber: Pribadi

Modulus rendah pada 200°C terjadi karena viskositas lelehan masih tinggi sehingga aliran ke cetakan kurang sempurna, *filler* tidak terdispersi homogen, dan derajat kristalinitas PLA rendah, menghasilkan struktur lebih *amorf* dan lunak dengan ikatan antarmuka matriks-*filler* yang lemah [29]. Pada 225°C, viskositas mencapai kondisi optimum sehingga campuran mengisi cetakan secara penuh, distribusi *filler* lignoselulosa lebih merata, dan kristalinitas PLA meningkat ke tingkat

sedang; kombinasi ini memperbaiki transfer tegangan dan membuat bioplastik lebih kaku sehingga modulus naik menjadi sekitar 1 GPa [17]. Kenaikan paling tajam pada 250°C mencerminkan struktur yang sangat kaku dengan modulus 2,323 GPa, dipengaruhi oleh kristalinitas yang jauh lebih tinggi serta *packing* rantai PLA yang rapat sehingga deformasi elastis menjadi sangat terbatas. Namun, suhu ini mendekati/melewati batas stabilitas termal PLA, sehingga terjadi degradasi rantai (*chain scission*) dan sebagian *filler* kulit pisang mulai terdekomposisi; secara makro material terlihat sangat kaku (modulus tinggi) tetapi kehilangan ketangguhan dan elongasi, yang konsisten dengan perilaku getas pada hasil uji tarik dan elongasi putus yang sangat rendah [17]. Pola ini menunjukkan *trade-off* antara kekakuan dan keuletan, di mana peningkatan modulus dengan suhu tinggi tidak selalu diikuti peningkatan performa mekanik keseluruhan karena risiko degradasi termal.

Tabel 1

Hasil Data Pengujian Tarik

No	Suhu °C	Tensile Strength (MPa)	Elongasi (%)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	200°C	27,09	10,36	21,99
2	225°C	50,96	8,76	49,96
3	250°C	35,97	3,51	30,40

Tabel hasil uji tarik pada tabel 1 menunjukkan bahwa variasi suhu pemrosesan berpengaruh signifikan terhadap perilaku mekanik bioplastik PLA-tepung kulit pisang, di mana pada 200°C diperoleh *tensile strength* terendah 27,09 MPa dengan elongasi tertinggi 10,36% dan modulus elastisitas 21,99 MPa yang menggambarkan material masih relatif lunak dan ulet akibat struktur lebih amorf serta distribusi *filler* yang kurang homogen [29]. Peningkatan suhu menjadi 225°C menghasilkan kondisi optimum dengan *tensile strength* tertinggi 50,96 MPa, elongasi sedang 8,76%, dan modulus 49,96 MPa, karena viskositas lelehan pada kisaran ini memungkinkan pengisian cetakan lebih sempurna, dispersi *filler* lignoselulosa merata, dan kristalinitas PLA berada pada tingkat menengah sehingga transfer tegangan antar matriks-*filler* berlangsung efektif dan tercapai keseimbangan antara kekuatan dan keuletan [6]. Pada 250°C, *tensile strength* menurun menjadi 35,97 MPa dan elongasi merosot tajam menjadi 3,51% sementara modulus masih relatif tinggi 30,40 MPa, yang mengindikasikan struktur bioplastik sangat kaku tetapi getas akibat kristalinitas yang meningkat disertai awal degradasi termal rantai PLA dan kerusakan *filler* kulit pisang, sehingga material menunjukkan deformasi elastis dan plastis yang sangat terbatas sebelum mengalami patah [30].

SIMPULAN

Simpulan dari penelitian ini adalah bahwa pemanfaatan tepung kulit pisang sebagai *filler* dalam matriks PLA berhasil menghasilkan bioplastik yang memiliki sifat mekanik dan biodegradabilitas yang dipengaruhi kuat oleh suhu pemrosesan *injection*

molding. Variasi suhu 200–250°C menunjukkan adanya kondisi optimum pada 225°C, di mana *tensile strength* dan modulus elastisitas mencapai nilai tertinggi dengan elongasi sedang, sehingga memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan, kekakuan, dan keuletan dibanding suhu 200°C yang masih menghasilkan struktur lunak dan kurang homogen maupun 250°C yang menyebabkan bioplastik sangat kaku tetapi getas akibat awal degradasi termal. Selain itu, penambahan tepung kulit pisang tidak hanya meningkatkan performa mekanik pada kondisi proses yang tepat, tetapi juga mendukung percepatan proses biodegradasi dibanding PLA murni, sehingga komposit PLA–kulit pisang berpotensi dikembangkan sebagai bahan alternatif plastik konvensional yang lebih ramah lingkungan sekaligus memanfaatkan limbah pertanian secara berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] “Global plastic recycling rates ‘stagnant’ under 10 %: Study,” pp. 1–4, 2025.
- [2] A. Chamas *et al.*, “Degradation Rates of Plastics in the Environment,” 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.9b06635.
- [3] F. A. de Carvalho, A. A. Moreira, A. L. M. de Oliveira, and F. Yamashita, “Biodegradation of poly(lactic acid)—cassava bagasse composites produced by injection molding,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 138, no. 28, 2021, doi: 10.1002/app.50667.
- [4] N. Sharma, S. Akhtar, and M. K. Ahmad Khan, “Bioplastics advances and their role in the management of plastic pollution,” *NeuroPharmac J.*, pp. 229–240, Aug. 2021, doi: 10.37881/1.620.
- [5] S. Alzate Acevedo, Á. J. Díaz Carrillo, E. Flórez-López, and C. D. Grande-Tovar, “Recovery of Banana Waste-Loss from Production and Processing: A Contribution to a Circular Economy,” *Molecules*, vol. 26, no. 17, pp. 1–30, 2021, doi: 10.3390/molecules26175282.
- [6] A. K. Trivedi, M. K. Gupta, and H. Singh, “PLA based biocomposites for sustainable products: A review,” *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 382–395, 2023, doi: 10.1016/j.aiepr.2023.02.002.
- [7] X. Zhao, “Super tough poly (lactic acid) blends;,” pp. 13316–13368, 2020, doi: 10.1039/d0ra01801e.
- [8] M. Lackner, A. Mukherjee, and M. Koller, “What Are ‘ Bioplastics ’? Defining Biocompatibility”.
- [9] J. Y. Boey and C. K. Lee, “Factors Affecting Mechanical Properties of Reinforced Bioplastics : A Review,” 2022.
- [10] GTMSmart, “Eco Friendly Biodegradable PLA Disposable Cutlery Forks Knives and Spoons,” 2025, *GTMSmart*. [Online]. Available: <https://www.gtmsmart.com/id/eco-friendly-biodegradable-pla-disposable-cutlery-forks-knives-and-spoons-product/>
- [11] K. Miller, C. L. Reichert, M. Loeffler, and M. Schmid, “Effect of Particle Size on the Physical Properties of PLA/Potato Peel Composites,” *Compounds*, vol. 4, no. 1, 2024, doi: 10.3390/compounds4010006.
- [12] F. M. Spinning, “Ingeo™ Biopolymer 6400D Technical Data Sheet,” pp. 1–4.
- [13] M. K. Gurunathan, R. J. H. Navasingh, J. D. R. Selvam, and R. Čep, “Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–17, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-00221-0.
- [14] R. A. Ilyas, S. M. Sapuan, M. M. Harussani, M. Y. A. Y. Hakimi, M. Z. M. Haziq, and M. S. N. Atikah, “Polylactic Acid (PLA) Biocomposite : Processing , Additive,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 1326, pp. 1–34, 2021.
- [15] Patabhi, Mahesh, and M. Kumar, “Mini Small Desktop Semi Automatic Plastic Moulding Vertical Pneumatic Machine,” 2025, *IndiaMART*. [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/mini-small-desktop-semi-automatic-plastic-moulding-vertical-pneumatic-machine-2850163528373.html>
- [16] F. Rivera-López, M. M. L. Pavón, E. C. Correa, and M. H. Molina, “Effects of Nozzle Temperature on Mechanical Properties of Polylactic Acid Specimens Fabricated by Fused Deposition Modeling,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 13, 2024, doi: 10.3390/polym16131867.
- [17] L. Aliotta, L. M. Sciara, P. Cinelli, I. Canesi, and A. Lazzeri, “Improvement of the PLA Crystallinity and Heat Distortion Temperature Optimizing the Content of Nucleating Agents and the Injection Molding Cycle Time,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 5, 2022, doi: 10.3390/polym14050977.
- [18] “Astm d638 type i,” p. 86.
- [19] L. Devikaduri and V. A. Handayani, “Environmentally Friendly Bioplastic Derived from Banana Peel (*Musa paradisiaca*) Waste and Agar-Agar Adhesive: An Experimental Study Employing a Completely Randomized Design (CRD),” *J. Sintak*, vol. 4, no. 1, pp. 8–14, 2025, [Online]. Available: <https://journal.iteba.ac.id/index.php/journalsintak/article/view/712>
- [20] V. Priya S, S. S. D, S. priya E, A. T.V., and A. B. Eluvathingal, “Bioplastic Synthesis and Characterization from Banana Peel,” *Int. J. Res. Publ. Rev.*, vol. 5, no. 4, pp. 7878–7883, 2024, doi: 10.55248/gengpi.5.0424.10120.
- [21] M. Alonso-González, D. Castro-Criado, M.

- Felix, and A. Romero, "Evaluation of rice bran varieties and heat treatment for the development of protein/starch-based bioplastics via injection molding," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 253, p. 127503, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127503.
- [22] W. Getnet, A. Ramachandran, K. Samuel, and L. Majamo, "Synthesis and characterization of bioplastic film from banana (Musa Cavendish species) peel starch blending with banana pseudo-stem cellulosic fiber," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 17, pp. 20419–20440, 2024, doi: 10.1007/s13399-023-04207-8.
- [23] S. J. Skosana, M. C. Khoathane, T. Malwela, and W. Webo, "Thermal and mechanical properties of polylactic acid reinforced with surface-treated hemp composites for automotive applications," *Sci. Prog.*, vol. 108, no. 4, pp. 1–35, 2025, doi: 10.1177/00368504251352072.
- [24] D. R. Cruz Fabian *et al.*, "Renewable Poly(Lactic Acid)Lignocellulose Biocomposites for the Enhancement of the Water Retention Capacity of the Soil," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 10, 2023, doi: 10.3390/polym15102243.
- [25] L. Wang, J. Abenojar, M. A. Martínez, and C. Santiuste, "Degradation of Mechanical Properties of Flax/PLA Composites in Hygrothermal Aging Conditions," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 4, 2024, doi: 10.3390/polym16040528.
- [26] J. Teknologi, "1,* , 2 , 3," vol. 24, no. 2, pp. 114–120, 2024.
- [27] S. Sun, Y. Weng, and C. Zhang, "Recent advancements in bio-based plasticizers for polylactic acid (PLA): A review," *Polym. Test.*, vol. 140, no. October, p. 108603, 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108603.
- [28] S. Ahsan, "Spektrum Inframerah dan Sifat Termal Poliasam Laktat (PLA): Perbandingan Filler Seng Oksida dan Kalsium Karbonat," *J. Teknol. dan Manaj.*, vol. 18, no. 2, pp. 40–50, 2020, [Online]. Available: www.iitk.ac.in
- [29] L. Meinig, R. Boldt, Y. Spoerer, and I. Kuehnert, "Correlation between Processing Parameters, Morphology, and Specimens at Different Length Scales," 2023.
- [30] P. Bioblends, F. Carrasco, and O. Santana, "Kinetics of the Thermal Degradation of Poly (lactic acid) and," pp. 1–15, 2021.