



Biodegradasi Bioplastik Berbahan Dasar Pati Daluga (*Cyrtosperma merkusii*) dengan *Cellulose Nano Crystal* sebagai Agen *Reinforcement* sebagai Dasar Pengembangan *Food Packaging*

Nobel Timbuleng^{1*}, Orbanus Naharia², Sukmarayu Piter Gedoan³, Yermia Samuel Mokusuli⁴, Dino Rahardyan⁵, Emma Mauren Moko⁶ 

^{1,2,3,4,5,6} Universitas Negeri Manado, Manado, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received June 08, 2023

Accepted September 06, 2023

Available online October 25, 2023

Kata Kunci:

Biodegradasi, bioplastik, *cellulose nano crystal*, daluga, *reinforcement*

Keywords:

Biodegradation, *bioplastics*, *cellulose nano crystal*, *daluga*, *reinforcement*.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Daluga (*Cyrtosperma merkusii*) adalah tanaman pesisir memiliki karakter sebagai tanaman paludikultur. Tanaman ini merupakan tanaman yang kurang dimanfaatkan sehingga cocok sebagai bahan utama bioplastik yang mana tidak berkompetisi dengan bahan pati pangan lainnya. Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kualitatif memberikan gambaran laju biodegradabilitas dalam tanah dan dalam consortium bakteri EM4 dari bioplastik daluga dengan plasticizer gliserol, subjek penelitian adalah bioplastik dari pati umbi daluga dengan gliserol sebagai plasticizer dibandingkan dengan bioplastik pati umbi daluga yang diperkuat strukturnya dengan selulosa nano kristal (CNC). Proses pengumpulan datanya dilakukan selama masa inkubasi tujuh hari, terhadap densitas, laju biodegradabilitas dalam tanah dan dalam larutan EM4, daya serap air, porositas, dan laju transmisi uap air, dimana dalam kurun waktu tersebut laju biodegradabilitasnya meningkat terutama bagi bioplastik dalam media tanah demikian juga bioplastik dalam EM4. Penambahan filler CNC memberikan nilai *reinforcement* bagi struktur bioplastik sehingga memperkuat struktur agar dapat dipergunakan sebagai kemasan bahan pangan dengan kadar air tinggi. Laju biodegradabilitas bioplastik daluga yang diperkuat oleh CNC lebih lambat baik yang dalam tanah maupun yang ada dalam larutan EM4. Keterbaruan dari penelitian ini adalah pengujian biodegradabilitas dari bioplastik yang menggunakan sumber pati underutilized berbasis kearifan lokal yang diperkuat (*reinforced*) strukturnya dengan CNC asal limbah pengolahan pati daluga.

ABSTRACT

Daluga (Cyrtosperma merkusii) is a paluculture plant that has coastal origins and currently underutilized, therefore as a starch source for TPS bioplastics would be a economical good potential since this starch doesnot compete with the current food starch commodities. This paper provides an illustration of the biodegradation rate for daluga bioplastics and how daluga starch in combination with glycerol as plasticizer copes with biodegradation in a burial test under soil (planting medium) and in liquid EM4 bacterial consortium. The subject of this research are TPS bioplastic developed from daluga starch with glycerol as its plasticizer comparing them to Cellulose Nano Crystal (CNC) reinforced daluga TPS bioplastic. Data collection was conducted on variables of density, biodegradability rate of the bioplastics in soil and EM4 solution (Bacterial Consortium Solution), Water absorption, porosity, and water vapor transmission. Biodegradability rate of daluga bioplastic increased during the 7 days incubation period, as is with CNC reinforced daluga TPS bioplastic. The addition of fillers like CNC provides a nano cellulosic reinforcement to the bioplastic starch matrix enabling for a more hydrophobic sheet for high moisture food packaging. The biodegradability rate for CNC reinforced daluga bioplastic is a tad slower for both in soil and in EM4 solution. The novelty of this research are the biodegradability testings of underutilized endemic starch base materials reinforced by CNC originating from the waste of the initial starch processing.

1. PENDAHULUAN

Pemakaian plastik petroleum (*chemical*) terutama yang bersifat *single use disposable* atau bersifat sekali pakai sudah terlampau banyak sehingga telah menjadi polutan utama pada tempat pembuangan akhir atau *municipal landfill*, bahkan Indonesia merupakan negara terbesar kedua penyumbang sampah plastik dunia sebesar 11,6 juta ton pada tahun 2021 sehingga dengan kondisi tersebut diperlukan adanya usaha untuk mendorong peralihan kemasan plastik *single use* ke bahan bioplastik (Bank et al., 2021; Schmaltz et al., 2020). Pengembangan bioplastik memerlukan bahan dasar serta diperlukan adanya bahan *filler* atau bahan pengisi untuk memperkuat struktur karakter mekanis bioplastik yang tidak berkompetisi

*Corresponding author.

E-mail addresses: emmamoko@unima.ac.id (Nobel Timbuleng)

dengan bahan pangan seperti halnya pati yang umumnya merupakan bahan utama pembuatan bioplastik terutama pati dari tanaman yang *underutilized* atau bukan sebagai komoditas pangan utama (Alves et al., 2015; Mousavi et al., 2021; Prasteen et al., 2018). Daluga (*Cyrtosperma merkusii*) merupakan tanaman pesisir paludikultur yang dapat menjadi sumber pati dan biomassa polisakarida lainnya yang tidak berkompetisi dengan bahan pangan dimana umbi daluga belum dimanfaatkan secara optimum sebagai sumber pangan utama, pati dari umbi daluga baik sekali digunakan sebagai bahan dasar bioplastik atau *thermoplastic starch* (TPS) dengan total pati sebesar 68,43% dan *resistant starch* sebesar 11,37% (Moko et al., 2023; Wahib et al., 2022). Sementara limbah dari proses pengolahan pati masih mengandung berbagai bahan serat selulosa yang berpotensi untuk diolah menjadi bahan selulosa nanokristal atau *cellulose nanocrystals* (CNC) yang dapat menjadi dijadikan *filler* TPS pati daluga (Das & Kalyani, 2023; Rahardiyana et al., 2023). Pengembangan bioplastik dengan tujuan mendapatkan bahan plastik yang *biodegradable* atau dapat dikomposkan dalam situasi alami oleh mikroorganisme pengurai atau proses dekomposisi secara enzimatik menggantikan plastik yang tidak mudah diurai. Oleh karena produksi bioplastik bertujuan untuk mendapatkan produk plastik yang dapat mengemulasikan proses siklus hidup biomassa sehingga bioplastik dapat terhidrolisa dan terdaur ulang kembali menjadi bahan yang ramah lingkungan serta menghilangkan ancaman polusi limbah plastik petroleum (Abdullah et al., 2019; Sugiharto et al., 2021). TPS dari pati terutama pati tapioka dan jagung merupakan produk bioplastik yang sudah umum dan memiliki tingkat biodegradabilitas yang sangat cepat dan baik.

Beberapa penelitian sebelumnya mengenai biodegradasi bioplastik dimana laju degradasi bioplastik berbahan baku pati singkong pada tanah sebesar 63%, ketahanan air bioplastik berbahan baku serbuk tongkol jagung sebesar 96,8% dengan waktu terdegradasi sempurna selama 8 hari sedangkan waktu degradasi bioplastik berbahan baku tandan kosong kelapa sawit selama dua minggu (Christwardana et al., 2022; Hamzah et al., 2021; Syuhada et al., 2020). Beberapa penelitian sebelumnya menambahkan bahan pengisi atau *filler* untuk memperkuat ketahanan terhadap air dan sifat mekanik pada bioplastik, beberapa bahan pengisi atau *reinforcement* berupa polivinil alkohol, logam ZnO, kitosan kulit udang (Hayati & Lazulva, 2018; Nur et al., 2020; Purnavita et al., 2020). Biodegradasi bioplastik berbahan baku limbah cair tahu dengan kitosan sebagai bahan pengisi atau *filler* sebesar 97,66% sedangkan bioplastik berbahan baku pati yam dengan bahan pengisi kitosan dan *clove oil* menghasilkan bioplastik dengan *water vapor transmission rate* terendah (Ulyarti et al., 2021; Widiatmono et al., 2021). Keterbaruan dari penelitian ini adalah tentang karakter biodegradasi dari bioplastik dengan penambahan komponen *reinforcing* sebagai salah satu faktor penting bagi pengembangan bioplastik, terutama bahan atau matriks penguat yang cocok dengan bahan dasar penyusun pati serta memenuhi tujuan utama penggunaan bioplastik yakni mempertimbangkan laju biodegradabilitasnya yang lebih cepat daripada plastik petroleum, namun dengan adanya *reinforcing* material seperti CNC sifat-sifat hidrofobis dari bioplastik dapat mendekati plastik petroleum. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui laju biodegradasi bioplastik berbahan dasar pati daluga dengan *cellulose nano crystal* (CNC) sebagai agen *reinforcement*.

2. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental diskriptif kualitatif yang mengangkat bahan dasar endemik (berbasis kearifan lokal) yang saat ini masih kurang pemanfaatannya (*underutilized*), yaitu ubi daluga (*Cyrtosperma merkusii*), yang dipergunakan sebagai bahan dasar pembuatan bioplastik TPS (*Thermoplastic starch*), sementara limbah proses pembuatan patinya diolah menjadi sumber selulosa nano kristal (CNC) yang menjadi material *reinforcement* dalam bioplastik tersebut. Bioplastik daluga ini baik yang tanpa maupun dengan *reinforcement* CNC bertindak sebagai subjek penelitian. Proses pengumpulan data adalah dari hasil observasi dan pengukuran terhadap laju biodegradabilitas baik dalam tanah maupun larutan konsortium bakteri EM4, daya serap air, porositas, dan laju transmisi uap air yang dilakukan selama kurun waktu 7 hari. Bahan utama penelitian ini adalah pati daluga, plasticizer gliserol Merck, asam asetat Merck, aquades, tanah komersial merek Trubus, *effective microorganism* (EM4), silica gel dan *cellulose nano crystal* dari limbah pengolahan pati daluga menggunakan metode *solid state fermentation* (SSF) kombinasi perlakuan mekanis pengecilan ukuran menggunakan *ultrafine grinding machine* sedangkan alat yang digunakan adalah timbangan analitik, hot plate stirrer, magnetic stirrer, micrometer dan desikator. Pembuatan bioplastik pati daluga sebagai bahan pembentuk matriks struktur pati menggunakan metode tuang (Nasution et al., 2018; Prasteen et al., 2018). Pati daluga sebanyak 5 gram dicampurkan dengan asam asetat (20% w/w) dan glycerol (30% w/w) selanjutnya semua bahan ditambahkan air destilasi atau akuades hingga 100 ml kemudian dipanaskan pada hot plate dengan pengadukan konstan pada suhu 80-90°C selama 30 menit hingga campuran tergelatinisasi dan membentuk pasta. Proses selanjutnya adalah menuangkan pasta dari campuran bahan tersebut ke cawan petri dan dibiarkan mengering dan mengeras pada suhu ruang.

Proses ini kembali menggunakan pati daluga sebanyak 5 gram yang ditambahkan dengan asam asetat (20%) dan glycerol (30%) kemudian ditambahkan campuran homogen konsentrasi CNC 20% (w/w) (0.02% CNC) dalam air destilasi hingga 100 ml. Seluruh campuran kemudian dipanaskan dengan pengadukan konstan pada suhu 80-90°C selama 30 menit hingga campuran tergelatinisasi dan membentuk pasta. Proses selanjutnya adalah menuangkan pasta dari campuran bahan tersebut ke cawan petri dan dibiarkan mengering dan mengeras pada suhu ruang. Densitas bioplastik didapatkan dari perbandingan antara berat bioplastik dan ketebalan bioplastik. Sampel bioplastik sebesar 3x3 cm² ditimbang kemudian diukur ketebalannya di tiga titik berbeda menggunakan micrometer.

Uji biodegradasi dilakukan mengikuti metode dari penelitian terdahulu, sampel bioplastik dipotong dengan ukuran 3x3 cm², bioplastik ditempatkan di bawah tanah sebanyak 30 gram selama 7 hari untuk mengukur laju kehilangan berat, setiap hari sampel diambil kemudian dibersihkan menggunakan aquades, dikeringkan anginkan kemudian berat kering sampel ditimbang (Chowdhury et al., 2022).

$$\text{Laju biodegradasi (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

dimana, W_1 = berat awal sampel bioplastik (gram)
 W_2 = berat akhir sampel bioplastik (gram)

Sampel bioplastik berukuran 5x5 cm ditimbang berat awalnya kemudian direndam dalam 40 ml larutan EM4 selama 7 hari dan diamati perubahan berat setiap harinya. Berat akhir kemudian ditimbang setelah perendaman selesai. Pengujian tersebut menghasilkan data berupa berat awal dan berat akhir yang dapat diolah menjadi biodegradasi bioplastik dengan persamaan berikut:

$$\text{Laju biodegradasi (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

dimana, W_1 = berat awal sampel bioplastik (gram)
 W_2 = berat akhir sampel bioplastik (gram)

Sampel bioplastik dipotong dengan ukuran 1x1 cm kemudian ditimbang dan ditempatkan pada 10 ml aquades, diamkan selama 1 menit, diangkat kemudian permukaan bioplastik dilap dengan tissue kering, sampel kemudian ditimbang. Perlakuan tersebut diulang hingga mendapatkan berat yang konstan.

$$\text{Absorbed Water (W) (\%)} = \frac{W}{W_0} \times 100\% \quad (3)$$

dimana, W = berat sampel setelah perendaman dalam air (gram)
 W_0 = berat kering sampel (gram)

Sampel bioplastik ukuran 1x1 direndam dalam 10 mL akuades selama 24 jam, kemudian dikeringkan menggunakan tissue dan ditimbang sehingga didapatkan nilai W_0 (gram) sebagai nilai berat basah bioplastik, setelah itu bioplastik dikeringkan menggunakan oven dan ditimbang sehingga didapatkan nilai W_1 (gram) sebagai berat kering bioplastik, nilai porositas dihitung dengan menggunakan rumus pada persamaan berikut :

$$P = \frac{W_0 - W_1}{v \cdot \rho_w} \times 100\% \quad (4)$$

dimana, P = porositas (%)
 W_0 = berat basah bioplastik (gram)
 W_1 = berat kering bioplastik(gram)
 V = volume bioplastik (cm³)
 ρ_w = massa jenis air (1 g/cm³)

Sampel bioplastik dengan ukuran 9x10 cm ditempatkan pada cawan petri yang berisi 3 gram silica gel, sampel ditimbang kemudian ditempatkan pada desikator. Berat sampel ditimbang setiap jam selama 5 jam pengamatan untuk mendapatkan angka laju transmisi uap air.













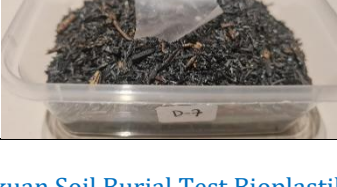

$$WVTR = \frac{G/t}{A} \quad (5)$$

dimana, WVTR = water vapor transmission rate (g/m² /hour)
 G/t = perbedaan berat per jam
 A = luas sampel bioplastik (m²)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

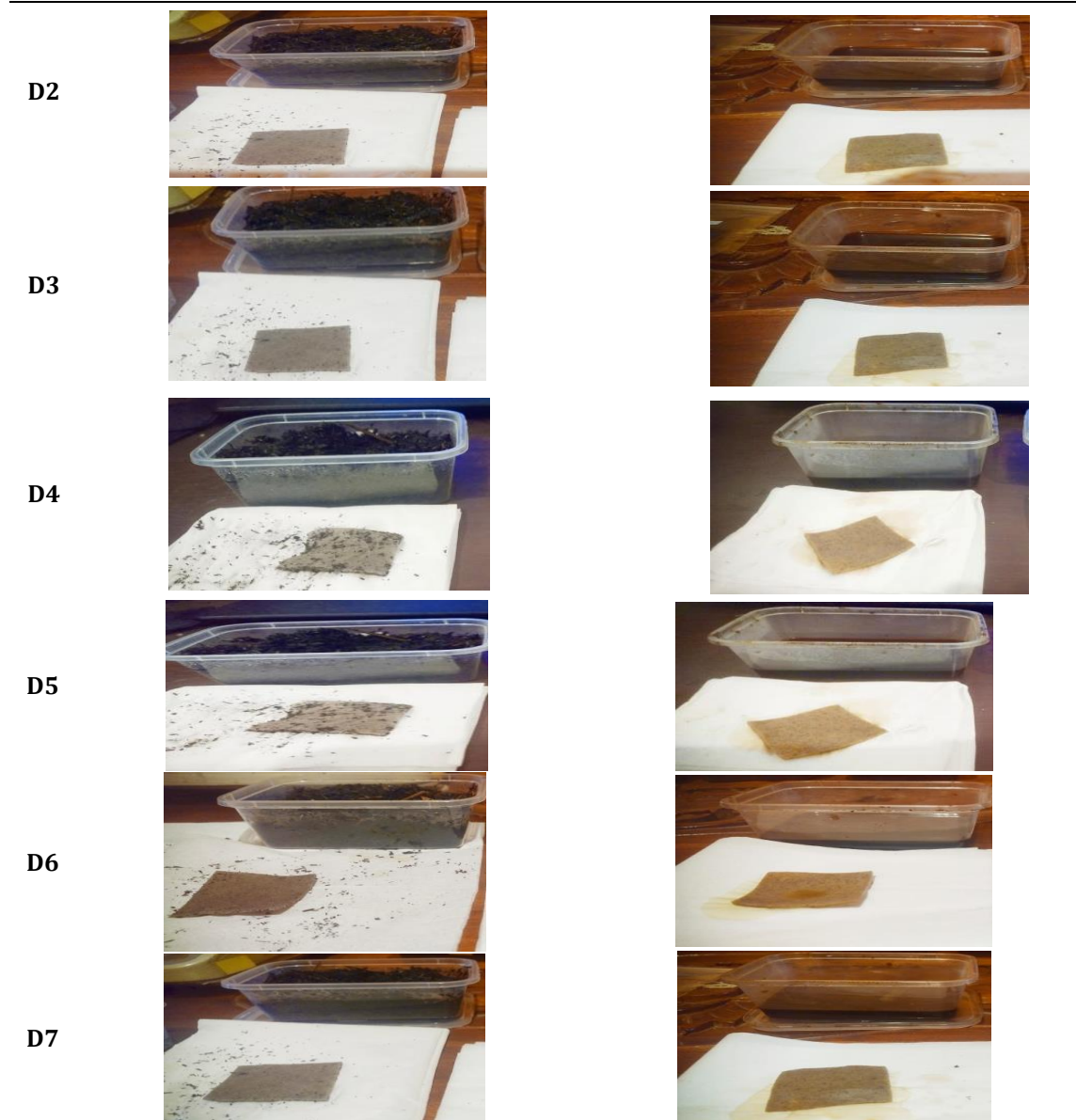
Hasil

Tabel 1. Perlakuan Soil Burial Test Bioplastik Dalam Media Tanah dan Uji Rendam dalam EM4

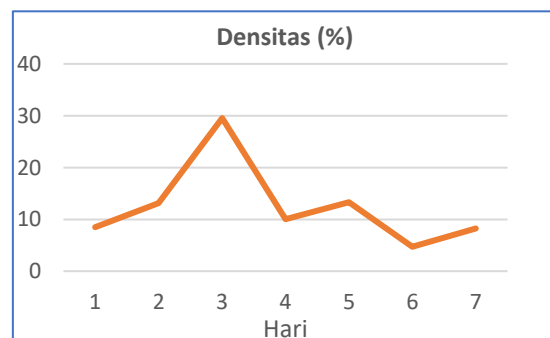
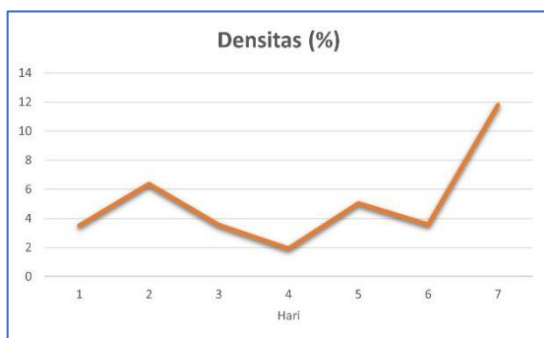
	Soil Burial Test	EM4 Test
D1		
D2		
D3		
D4		
D5		
D6		
D7		

Tabel 2. Perlakuan Soil Burial Test Bioplastik Reinforce CNC Dalam Media Tanah dan Uji Rendam dalam EM4

	Soil Burial Test	EM4 Test
D1		



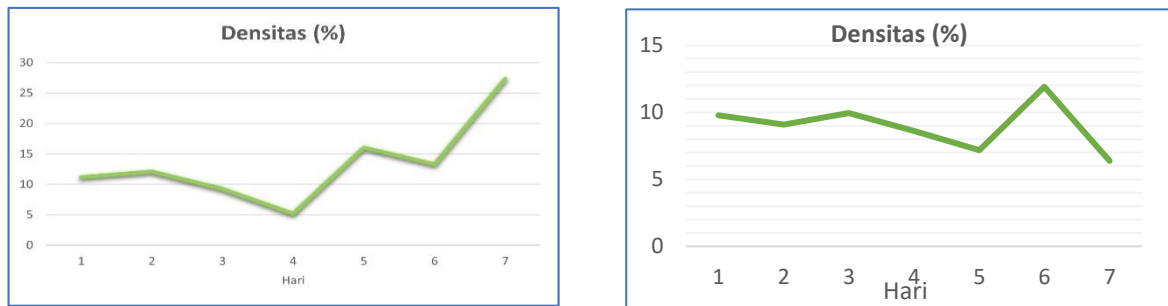
Densitas Bioplastik



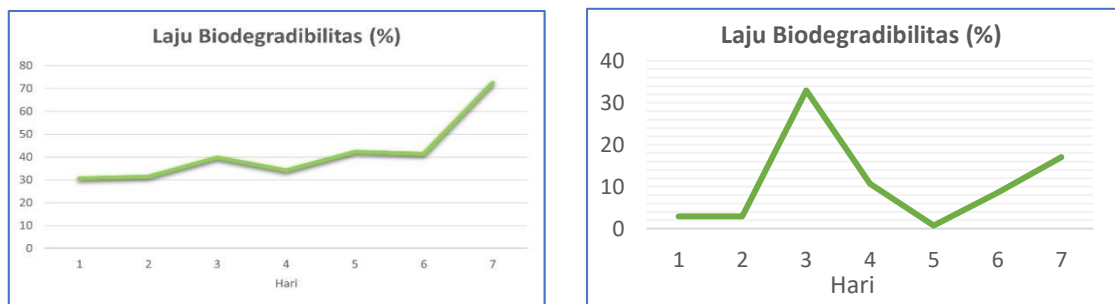
Gambar 1. Perubahan Densitas Bioplastik (a) vs Bioplastik Reinforce CNC (b) pada Media Tanah.

Densitas dari bioplastik dari pati daluga terlihat mengalami kenaikan selama 7 hari proses biodegradasi baik dalam media tanah maupun dalam EM4. Dalam media tanah kenaikan tersebut signifikan pada hari ke-7 mencapai densitas 27, 35mm/gram ($p < 0,05$) seperti yang disajikan pada Gambar 1a, sedangkan dalam EM4 perubahan densitas ini pada hari ke-7 mencapai titik 11,82% namun

perubahan ini tidaklah signifikan adanya ($p < 0,05$) seperti yang disajikan pada Gambar 2a. Densitas bioplastik dengan penambahan CNC dalam media tanah terlihat mengalami kenaikan signifikan pada hari ke-3 mencapai densitas 29,53mm/gram ($p < 0,05$) seperti yang disajikan pada Gambar 1b sedangkan dalam media EM4 perubahan kenaikan densitas pada hari ke-6 mencapai titik 11,90mm/gram ($p < 0,05$) seperti yang disajikan pada Gambar 2b. Hal ini juga tampak pada ketebalan bioplastik yang ada dalam rentang 0,011mm hingga 0,037mm dan 0,16-0,46mm untuk bioplastik *reinforce* CNC, namun rentang ini tidak tampak adanya perubahan yang signifikan selama 7 hari proses biodegradasi seperti halnya berat.



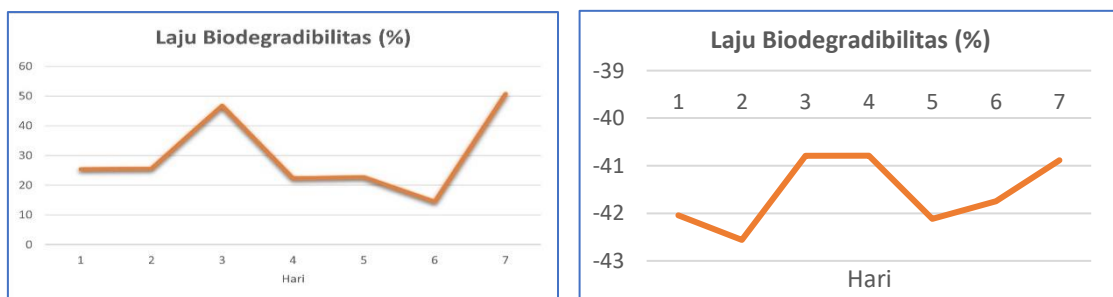
Gambar 2. Perubahan Densitas Bioplastik (a) vs Bioplastik *Reinforce* CNC (b) pada Media EM4.



Gambar 3. Laju Biodegradasi Bioplastik pada Media Tanah (*Soil Burial Test*).

Perlakuan *Soil Burial Test* Bioplastik Dalam Media Tanam dan Uji Rendam dalam EM4 divisualisasi dan disajikan pada Tabel 1. Laju biodegradasi bioplastik merupakan uji yang bertujuan untuk mengetahui atau memperkirakan berapa lama waktu yang dibutuhkan oleh bioplastik hingga dapat terdegradasi namun ada kekurangan dari pengujian tersebut yaitu penyebab degradasi bioplastik tidak dapat memastikan degradasi tersebut disebabkan oleh mikroorganisme atau degradasi oleh absorpsi air ke dalam bioplastik. Laju biodegradasi bioplastik dalam media tanah (*soil burial test*) pada Gambar 3a memperlihatkan laju yang semakin meningkat secara signifikan terutama dari hari ke-6 hingga hari ke-7, namun pada hari ke-3 hingga ke-6 walaupun terlihat adanya peningkatan laju kecepatan biodegradasi namun tidaklah signifikan ($p < 0,05$) sedangkan laju biodegradasi bioplastik dengan penambahan CNC memperlihatkan laju yang semakin meningkat secara signifikan pada hari ke-2 hingga hari ke-3 namun laju biodegradasi mengalami penurunan mulai hari ke-3 hingga hari ke-5 dan terjadi kenaikan laju biodegradasi pada hari ke-5 hingga hari ke-7 seperti yang disajikan pada Gambar 3b.

Laju Biodegradasi Bioplastik Menggunakan EM4



Gambar 4. Laju Biodegradasi Bioplastik(a) vs Bioplastik *Reinforce* CNC (b) pada Media EM4.

Perlakuan Soil Burial Test Bioplastik Reinforce CNC Dalam Media Tanah dan Uji Rendam dalam EM4 divisualisasi dan disajikan pada [Tabel 2](#). Laju biodegradasi bioplastik yang berada dalam EM4 yang memperlihatkan adanya kenaikan laju yang signifikan dari hari ke-2 hingga ke-3 namun sesudah itu tampak adanya penurunan kecepatan degradasi yang kemudian laju kecepatan ini meningkat ulang secara drastis pada hari ke-6 menuju ke hari ke-7 ($p < 0,05$) seperti yang disajikan pada [Gambar 4a](#) sedangkan laju biodegradasi bioplastik dengan penambahan CNC memperlihatkan adanya kenaikan laju yang signifikan dari hari ke-2 hingga ke-4 namun sesudah itu mengalami penurunan kecepatan biodegradasi pada hari ke-5 dan kemudian laju biodegradasi meningkat lagi pada hari ke-6 dan hari ke-7 ($p < 0,05$) seperti yang disajikan pada [Gambar 4b](#).

Daya Serap Air (*Water Absorbed*)

Uji penyerapan air dilakukan untuk memberikan gambaran kemampuan bioplastik menyerap air dan ketahanannya terhadap air. Ketahanan atau kualitas dari bioplastik terhadap air dilakukan melalui uji daya serap air, dimana semakin tinggi daya serap bioplastik terhadap air maka semakin rendah kualitas atau ketahanan dari bioplastik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bioplastik daluga memiliki daya serap terhadap air yaitu sebesar $0.342 \pm 0.03\%$ sedangkan daya serap bioplastik dengan *reinforce* CNC terhadap air sebesar $0.267 \pm 0.05\%$.

Porositas

Nilai porositas merupakan prediksi banyaknya nilai kosong pada bioplastik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai porositas dari bioplastik daluga sebesar $51.04 \pm 0.05\%$ sedangkan nilai nilai porositas dari bioplastik daluga dengan *reinforce* CNC sebesar 40.77 ± 0.10 .

Laju Transmisi Uap Air (*Water Vapor Transmission Rate*)

Permeabilitas uap air merupakan jumlah uap air yang hilang per satuan waktu dibagi dengan luas area bioplastik, merupakan nilai yang menyatakan jumlah uap air yang dapat melewati melalui lapisan film bioplastik dan merupakan kemampuan bioplastik untuk menghambat perpindahan uap air antara bahan yang dikemas dan lingkungan sekitar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai permeabilitas uap air bioplastik daluga sebesar $0.0279 \text{ g/m}^2.5\text{jam}$ sedangkan nilai permeabilitas uap air bioplastik daluga dengan *reinforce* CNC sebesar $0.0069 \text{ g/m}^2.5\text{jam}$.

Pembahasan

Densitas merupakan salah satu karakter bioplastik yang sangat penting karena menunjukkan kerapatan antar komponen penyusun bioplastik, densitas merupakan perbandingan antara massa per volume dari bioplastik ([Nisa et al., 2016](#); [Nugrahanto et al., 2021](#)). Ketebalan bioplastik bioplastik daluga masih berada dalam standard yang menjadi prasyarat JIS (*Japanese Industrial Standard*) yakni maksimal 0,25mm, ketebalan bioplastik daluga juga lebih rendah dibanding bioplastik dari yam yaitu 0,176mm, bioplastik dari pati kentang 0,08mm, bioplastik berbahan baku limbah kulit singkong sebesar 269,066 μm dan bioplastik berbahan baku tapioka sebesar 0,27mm ([Manrich et al., 2017](#); [Nugrahanto et al., 2021](#); [Nurulhasni, 2023](#); [Ulyarti et al., 2021](#)). Sedangkan bioplastik dengan *reinforce* CNC mengalami peningkatan ketebalan dengan range hingga 0,46mm sehingga menyebabkan peningkatan densitas bioplastik dengan *reinforce* CNC dimana range densitas dari penelitian ini 4,71-29,53 g/mm , bioplastik dengan penambahan *reinforce* kitosan secara signifikan meningkatkan ketebalan bioplastik karena ada peningkatan total padatan terlarut dari bahan pembentuk bioplastik, dimana nilai ketebalan sangat dipengaruhi oleh luasan area cetakan dan konsentrasi asam yang ditambahkan dalam formulasi bioplastik ([Dea et al., 2022](#); [Hayati & Lazulva, 2018](#)). Laju transmisi uap air, gas dan senyawa volatil lainnya merupakan salah satu sifat fisik lainnya seperti *tensile strength* dan elongasi dari bioplastik yang dipengaruhi oleh ketebalan sementara nilai densitas dipengaruhi oleh nilai densitas bahan baku, kecepatan pengadukan, serta rasio antara polisakarida dan protein ([Nugrahanto et al., 2021](#); [Nugroho et al., 2013](#)).

Laju biodegradabilitas menggambarkan potensi penguraian dari bioplastik, karenanya prosesnya pengujiannya dilakukan dengan penguburan potongan bioplastik didalam tanah dan ditimbang massa atau berat bioplastik dalam setiap frekuensi unit satuan waktu yang tetap. Beberapa faktor yang menentukan dalam proses degradasi polimer yaitu sinar matahari, panas, umur dan faktor alam sedangkan ketebalan bioplastik tidak berpengaruh terhadap laju biodegradasi sehingga matriks penyusun utama bioplastik merupakan faktor utama laju biodegradasi, dimana Faktor penentu biodegradabilitas bioplastik tidak sepenuhnya tergantung kepada mikroba pengurai namun juga pada kapasitas hidrofobisitas permukaan dan daya serap air bioplastik. Laju biodegradasi di titik awal pengujian kurang dikarenakan mikroorganisme tanah yang ada sedang beradaptasi terhadap keberadaan

sampel sehingga memerlukan adanya waktu adaptasi. Laju biodegradasi ini meningkat setelah kurun waktu 1 minggu untuk kedua sampelnya, karena adanya produksi CO₂ (Espitia et al., 2014; Sharma et al., 2017). Proses biodegradasi pada umumnya akan langsung dimulai dan tingkat BOD akan seiring dengan tingginya konsentrasi gliserol dalam bioplastiknya, hal ini diduga karena semakin tingginya degradasi dari molekul gliserol (Wadaugsorn et al., 2022; Wongphan et al., 2022). Biodegradasi dari bioplastik dipengaruhi oleh struktur fisika dan kimiawinya, seperti rantai polimernya, gugus-gugus fungsinya, dan kristalinitasnya. Selain itu juga oleh kondisi lingkungan bioplastik tersebut dipergunakan seperti kelembaban, oksigen, suhu, dan pH. Proses biodegradasi merupakan sekumpulan proses reaksi-reaksi enzimatik terhadap material-material baik organik maupun non-organik yang dikatalisa oleh mikroorganisme seperti aktinobakteria (*Amycolatopsis* dan *Streptomyces*), bakteri-bakteri (*Paenibacillus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Burkholderia*), serta golongan fungi dalam berbagai lingkungan hidup (Samalens et al., 2022; Tang et al., 2022; Wu et al., 2022; Yasin et al., 2022).

Sementara laju biodegradasi yang lebih rendah untuk bioplastik dengan *reinforce* CNC disebabkan oleh bahan penguat dari partikel nanoselulosa yang bertindak sebagai penghalang bagi laju difusi air ke dalam polimer bioplastik, hal ini juga didukung dengan hasil laju transmisi uap air bioplastik dengan *reinforce* CNC yang lebih rendah dibandingkan dengan bioplastik tanpa *reinforce* selain itu faktor ketebalan dan densitas yang meningkat pada bioplastik dengan *reinforce* CNC menyebabkan laju biodegradasi menjadi lebih lambat, biodegradabilitas bioplastik dengan penguat ZnO mempunyai kecenderungan lebih lambat. Kehadiran gliserol dalam formulasi bioplastik mempercepat laju proses degradasi dan mengurangi massa sampel, hal ini disebabkan oleh sifat alami gliserol yang hidrofilik dan mudah terlarut dalam air. Keadaan ini yang menyebabkan gliserol menyerap air dalam tanah dan berdampak pada proses degradasi bioplastik (Abdullah et al., 2019; Sugiharto et al., 2021). Serapan air tinggi dari bioplastik disebabkan oleh tingginya kandungan pati dari bioplastik dimana keberadaan air ini melemahkan ikatan-ikatan ionik dalam amilosa pati dan menyebabkan pati semakin menyerap air dan menyerupai bubur sehingga kondisi ini menyebabkan bioplastik semakin rentan terhadap serangan mikroba dengan demikian hal ini akan mempercepat laju biodegradasi bioplastiknya (Darni et al., 2017; Luchese et al., 2021). Gugus hidroksil dari pati merupakan aktivator dari proses hidrolisis polimer, sehingga mempermudah air untuk terserap dari tanah dan mikroba untuk berproses dalam biodegradasi. Perubahan pada struktur secara makro akan terlihat jelas pada proses biodegradasi yang terkubur dalam tanah (Onovo et al., 2022; Pongputthipat et al., 2023).

Dalam penelitian lain ditemukan adanya peningkatan laju biodegradabilitas yang dikarenakan adanya penambahan pati dari buah *berry* dalam formulasi dasar bioplastiknya. Hal ini disebabkan karena adanya senyawa-senyawa fenolik yang diduga sebagai penanggungjawab cepatnya proses biodegradasi. Senyawa fenolik secara alami juga merupakan senyawa yang mudah terurai karena dengan mudah dapat berubah menjadi kuinon yang berikatan silang dengan protein yang selanjutnya berikatan kovalen silang pada suasana asam tinggi. Ikatan kovalen C-N terbentuk karena reaksi kuinon dengan polipeptida amino yang ada, disamping proses degradasi kuinon tunggal yang menjadi karbon dioksida selama proses fermentasi. Pengujian biodegradasi bioplastik penting dilakukan hal ini dalam kaitannya apabila bioplastik dipergunakan sebagai kemasan yang mengemas bahan makanan (*food product*) yang memiliki kadar air tinggi, dan juga bagaimana bioplastik tersebut dapat terdegradasi apabila terbuang dalam saluran badan air sehingga pengujian biodegradasi dilakukan dalam cairan larutan EM4. Oleh karena dalam kajian ini juga ditinjau kemampuan bioplastik dalam laju transmisi uap air (*water vapor transmission rate*). Bioplastik pati daluga dalam penelitian ini memiliki kemampuan penyerapan air (*water absorbance*) 26,99% dan ketahanan terhadap air (*water resistance*) 73,01% dengan porositas sebesar 40,77% sedangkan kemampuan bioplastik pati daluga ini dalam mentransmisikan uap air adalah 0,03 g/m².5jam. Nilai laju transmisi uap air sesuai dengan *Japanese Industrial Standard* adalah 10g/m² (Dea et al., 2022; Hayati & Lazulva, 2018). Penambahan bahan penguat seperti CNC, kitosan atau ZnO menyebabkan penurunan nilai WVTR pada bioplastik, dimana uap air tidak dapat melewati bioplastik dan terserap oleh bahan penguat tersebut. Hal ini dikarenakan sifat bahan penguat seperti ZnO yang hidrofobik, sehingga uap air dapat melewati bioplastik akan semakin rendah, selain itu penurunan nilai WVTR terjadi karena ZnO mempunyai resistansi yang lebih baik terhadap air jika dibandingkan dengan matriks pati. Penambahan ZnO memberikan penghalang bagi molekul air untuk lewat dimana semakin kecil migrasi uap air yang terjadi pada produk yang dikemas oleh bioplastik, maka semakin baik karakter dari bioplastik dalam mempertahankan umur simpan produk yang dikemas (Agustin & Padmawijaya, 2016; Lazuardi & Cahyaningrum, 2013). Karakter-karakter bioplastik terhadap penyerapan air, ketahanan permukaannya terhadap air dan kemampuannya dalam mentransferkan uap air terkait dengan sifat karakter pati bahan baku asal dan *plasticizer* yang dipergunakan. Adanya peningkatan konsentrasi *plasticizer* dalam formula akan meningkatkan sifat hidrofilik dari struktur jaringan polimer yang semakin tidak padat, sehingga terjadi peningkatan di kemampuan polimer untuk mentransferkan uap air dan

menyebabkan fleksibilitas dalam bioplastik yang dihasilkan (Alcivar-Gavilanes et al., 2022; Dea et al., 2022). Penambahan gliserol akan mempercepat proses degradasi pada plastik namun menurunkan nilai persentase (%) ketahanan air, nilai kuat tarik, dan nilai titik leleh. Gliserol merupakan *plasticizer* yang bersifat hidrofilik yang ditambahkan kedalam bioplastik untuk membantu supaya film yang dihasilkan lentur dan tidak getas dengan cara membantu penyerapan air dan menahan kadar air saat proses retrogradasi dan *glass transition* dari pati bioplastik (Emadian et al., 2017; Sugiharto et al., 2021). Kualitas dari pati yang dipergunakan akan mempengaruhi sifat-sifat dan karakter dari bioplastik yang dihasilkan, sementara ketahanan air merupakan sifat yang penting dari bioplastik terutama saat bioplastik ini hendak dipergunakan sebagai pelindung atau kemasan makanan karena aktifitas air yang tinggi dari makanan dapat menyebabkan potensi kerusakan kemasan yang tinggi sehingga resistensi air atau sifat hidrofobitas merupakan salah satu faktor penting (Moro et al., 2017; Rahardiyan et al., 2023).

Kandungan amilosa dan amilopektin dari pati merupakan faktor-faktor penentu dalam kualitas produk olahan pati, dimana semakin tinggi amilosanya maka semakin tinggi solubilitasnya sehingga semakin tinggi pula kecenderungan retrogradasinya. Amilosa akan mengalami retrogradasi lebih cepat daripada amilopektin karena strukturnya yang linear dan polaritasnya yang tinggi. Amilosa memiliki kecenderungan untuk membentuk ikatan hidrogen diantara gugusan-gugusan hidroksilnya diantara senyawa yang berdekatan, sehingga menyebabkan penyusutan dari pati oleh karena itu semakin tinggi kandungan amilopektin, semakin rendah kecenderungan retrogradasinya dan menghasilkan bioplastik yang lebih baik. Salah satu parameter kualitas bioplastik dipengaruhi oleh daya serap air dimana uji daya serap air dilakukan untuk mengetahui tingkat ketahanan bioplastik terhadap air, semakin tinggi daya serap bioplastik terhadap air maka semakin rendah kualitas ketahanan dari bioplastik tersebut. Plastik yang baik memiliki ketahanan yang tinggi terhadap air dan penyerapan terhadap air rendah untuk memastikan produk yang dikemas aman dari kerusakan oleh air (Christwardana et al., 2022; Hamzah et al., 2021; Syuhada et al., 2020). Bioplastik daluga dengan *reinforce* CNC memiliki daya serap terhadap air yang rendah bila dibandingkan dengan beberapa bioplastik lainnya seperti bioplastik bioplastik pati dengan penambahan kitosan dan sorbitol yaitu sebesar 144,04%. Penambahan konsentrasi *plasticizer* seperti gliserol memberikan pengaruh yang besar terhadap kemampuan daya serap air dari bioplastik dimana semakin besar konsentrasi gliserol yang ditambahkan maka semakin tinggi nilai daya serap air, hal ini berkaitan dengan sifat hidrofilik dari gliserol yang menyebabkan bioplastik lebih mudah menyerap air. Peningkatan daya serap air terkait dengan gliserol dan keberadaan serat yang ada mengindikasikan sifat-sifatnya gliserol dan polimernya yang sangat hidrofilik. Kehadiran dari ketiga gugusan hidroksil dalam gliserol memiliki kemampuan untuk menyerap air kedalam struktur matriks pati dan menjebak air didalam matriksnya saat proses bioplastik mengalami retrogradasi sehingga amilosa kembali kedalam struktur matriks, tetapi hal ini menyebabkan lenturnya bioplastik sehingga gliserol menjadi pilihan yang baik sebagai *plasticizer* bioplastik. Nilai porositas tergantung dari jumlah polimer bahan dasar pembuatan bioplastik, polimer akan memperkecil rongga dalam gel sehingga akan meningkatkan gaya ikat antar polimer dan menurunkan perpindahan bioplastik terhadap gas dan uap dengan demikian fungsi bioplastik sebagai barrier bagi perpindahan air, gas dan uap akan mengalami peningkatan.

Nilai permeabilitas uap air bioplastik daluga dengan *reinforce* CNC sebesar 0.0069 g/m².5jam, dimana nilai permeabilitas bioplastik daluga cukup rendah sehingga ketahanan bioplastik untuk menghambat uap air cukup baik, nilai tersebut lebih rendah jika dibandingkan nilai permeabilitas uap air bioplastik berbahan baku umbi porang yaitu sebesar 0.3791 g/m² (Hayati & Lazulva, 2018; Nur et al., 2020; Purnavita et al., 2020). Proses migrasi uap air umumnya terjadi pada bagian hidrofilik dari bioplastik dimana semakin besar nilai hidrofobitas bioplastik maka nilai laju transmisi uap air bioplastik tersebut akan semakin turun sehingga semakin besar hidrofilitas bioplastik maka nilai laju transmisi uap air juga akan semakin naik. Nilai transmisi uap air berkaitan erat dengan amilosa-amilopektin dan retrogradasi dari pati yang digunakan dalam pembuatan bioplastik, dimana semakin sedikit amilosa yang retrogradasi kembali ke granula asal maka semakin banyak pula jumlah pori dipermukaan bioplastik sehingga semakin banyak pula uap air yang dapat terlewat, demikian juga penggunaan *plasticizer* (gliserol) yang digunakan dalam formulasi yang bersifat hidrofilik mampu menurunkan tegangan antar molekul pada matriks bioplastik sehingga menyebabkan ruang antar molekul semakin besar dan uap air bisa menembus bioplastik (Hayati & Lazulva, 2018; Nur et al., 2020).

Sifat hidrofilik dari *plasticizer* menyebabkan adanya modifikasi struktur jaringan polimer menjadi kurang padat sehingga menyebabkan uap air lebih mudah melewati permukaan bioplastik, dimana peningkatan *plasticizer* dapat meningkatkan adsorpsi dan desorpsi molekul air sehingga meningkatkan nilai laju transmisi uap air pada bioplastik berbahan hidrofilik (Khazaei et al., 2014; Mohammadi Nafchi et al., 2017). Selain itu faktor lain yang mempengaruhi laju transmisi uap air adalah ketebalan dari bioplastik dimana laju transmisi uap air akan semakin rendah seiring dengan peningkatan ketebalan bioplastik (Kusumawati & Putri, 2013; Warkoyo et al., 2014).

Kelebihan dari studi ini membuktikan bahwa bahan kearifan lokal daluga dapat dimanfaatkan sebagai pati bahan dasar bioplastik dengan laju biodegradasi yang cepat, walaupun telah diperkuat strukturnya dengan CNC sehingga kontribusi dari penelitian ini adalah bahwa pati *underutilize* apabila dimanfaatkan dapat mengurangi penggunaan bahan-bahan pati yang memang menjadi bahan pangan, sehingga bahan untuk pengembangan bioplastik tidak menjadi kompetisi dengan komoditas bahan pangan yang sudah beredar di pasar khalayak umum, dimana membawa implikasi bahwa laju biodegradabilitas dari bioplastik yang cepat dengan menggunakan bahan berbasis kearifan lokal daluga yang tidak berkompetisi dengan bahan pangan sangat membuka peluang untuk menjadikan pati daluga sebagai bahan pati untuk TPS bioplastik, sementara dengan CNC dari limbah pengolahan pati daluga dapat memberikan fungsi hidrofobisitas yang diperlukan sebagai bahan plastik walaupun sedikit memperlambat biodegradabilitasnya namun masih memberikan indikasi bahwa bioplastiknya masih memiliki laju biodegradabilitas yang lebih cepat daripada plastik petroleum. Namun demikian keterbatasan dari penggunaan daluga adalah saat ini daluga hanya ditemukan di Kepulauan Sangihe dan Talaud, dan perlu proses yang panjang untuk dapat membudidayakan daluga di berbagai kondisi klimatologi dan kimia tanah lahan lainnya di pulau lain selain habitat asalnya sehingga dapat direkomendasikan untuk keberlanjutan dari penelitian ini adalah untuk memperdalam penelitian akan sifat-sifat dan karakteristik bioplastik TPS daluga serta perlu penelitian khusus akan berbagai metode dalam proses pembuatan bioplastik TPS daluga hingga dapat diketahui seberapa jauh bioplastik TPS daluga ini dapat diaplikasikan dalam industri kemasan, dan aplikasi dalam industri plastik lainnya selain sifat-sifat bioplastiknya sendiri perlu adanya studi yang secara mendalam perihal budidaya dari tanaman daluga sendiri.

4. SIMPULAN

Karakter pati bahan dasar merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap laju biodegradabilitas dari bioplastic. Hal ini dikarenakan karena karakter retrogradasi dari pati berbeda-beda tergantung dari komposisi polisakaridanya terutama amilosa-amilopektinnya. Perbedaan ini menyebabkan variasi dalam kepadatan dari matriks film yang terbentuk saat pati dibuat menjadi bioplastik. Pati dari daluga memiliki karakter gelatinisasi yang kuat dengan retrogradasi cepat sehingga menghasilkan bioplastik dengan porositas yang kecil sehingga memiliki sifat hidrofobisitas yang baik yang sangat berpengaruh terhadap laju biodegradabilitasnya. Laju biodegradabilitas bioplastik daluga dalam tanah lebih pesat daripada dalam cairan EM4 yang diduga dikarenakan serapan air dari bioplastik daluga yang mempertahankan kelenturannya dan tidak mudah getas dibandingkan saat dikubur di tanah dimana kondisi kelembaban dan porositas tanah menyebabkan perebutan air dan terpindahnya kandungan air dari bioplastik daluga dan menyebabkan bioplastik kehilangan kelenturannya dan menjadi lebih kering dan getas sehingga lebih mudah terdegradasi. Perlu adanya bahan tambahan komponen *reinforcing (filler)* yang berfungsi memperkuat struktur matriks bioplastik dan menurunkan porositas serta laju keluarnya kandungan air dari dalam bioplastik sehingga bioplastik memiliki ketahanan yang lebih sehingga dapat lebih dipergunakan sebagai kemasan bahan makanan dengan kadar air tinggi pada permukaannya.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dilaksanakan melalui pembiayaan oleh Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian Kepada Masyarakat (DRTPM), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan dan Ristek Dikti melalui Hibah Tesis Magister (PTM) 2023, nomor kontrak 141/E5/PG.02.00.PL/2023.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. H. D., Fikriyyah, A. K., & Dewantoro, R. (2019). Fabrication and characterization of starch based bioplastics with palm oil addition. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 20(3), 126–131. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2019.20.3.4846>.
- Agustin, Y. E., & Padmawijaya, K. S. (2016). Sintesis bioplastik dari kitosan-pati kulit pisang kepok dengan penambahan zat aditif. *Jurnal Teknik Kimia*, 10(2), 43–51. <http://ejournal.upnjatim.ac.id/index.php/tekkim/article/view/537/423>.
- Alcivar-Gavilanes, M. G., Carrillo-Anchundia, K. L., & Rieral, M. A. (2022). Development of a bioplastic from banana peel. *Ingeniería e Investigación*, 42(3), 1–8. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.92768>.
- Alves, J. S., Dos Reis, K. C., Menezes, E. G. T., Pereira, F. V., & Pereira, J. (2015). Effect of cellulose nanocrystals and gelatin in corn starch plasticized films. *Carbohydrate Polymers*, 115, 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.057>.
- Bank, M. S., Swarzenski, P. W., Duarte, C. M., Rillig, M. C., Koelmans, A. A., Metian, M., & Ok, Y. S. (2021).

- Global plastic pollution observation system to aid policy. *Environmental Science & Technology*, 55(12), 7770–7775. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00818>.
- Chowdhury, M., Hossain, N., Noman, T. I., Hasan, A., Shafiul, A., & Abul, K. M. (2022). Biodegradable, physical and microbial analysis of tamarind seed starch infused eco-friendly bioplastics by different percentage of Arjuna powder. *Results in Engineering*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100387>.
- Christwardana, M., Ismojo, I., & Marsudi, S. (2022). Biodegradation Kinetic Study of Cassava & Tannia Starch-Based Bioplastics as Green Material in Various Media. *Molekul*, 17(1), 19–29. <https://doi.org/10.20884/1.jm.2022.17.1.5591>.
- Darni, Y., Dewi, F. Y., & Lismeri, L. (2017). Modification of Sorghum Starch-Cellulose Bioplastic with Sorghum Stalks Filler. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 12(1), 22–30. <https://doi.org/10.23955/rkl.v12i1.5410>.
- Das, S., & Kalyani, M. I. (2023). From trash to treasure: review on upcycling of fruit and vegetable wastes into starch based bioplastics. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 53(7), 713–727. <https://doi.org/10.1080/10826068.2022.2158470>.
- Dea, F. I., Purbowati, I. S. M., & Wibowo, C. (2022). Karakteristik Edible Film yang Dihasilkan Dengan Bahan Dasar Pektin Kulit Buah Kopi Robusta dan Glukomanan. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 16(3), 439–449. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v16i3.11480>.
- Emadian, S. M., Onay, T. T., & Demirel, B. (2017). Biodegradation of bioplastics in natural environments. *Waste Management*, 59, 526–536. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.006>.
- Espitia, P. J. P., Du, W. X., de Jesús Avena-Bustillos, R., Soares, N. D. F. F., & McHugh, T. H. (2014). Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties-A review. *Food Hydrocolloids*, 35, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.06.005>.
- Hamzah, F. H., Sitompul, F. F., Ayu, D. F., & Pramana, A. (2021). Effect of the Glycerol Addition on the Physical Characteristics of Biodegradable Plastic Made from Oil Palm Empty Fruit Bunch. *Industria: Jurnal Teknologi Dan Manajemen Agroindustri*, 10(3), 239–248. <https://doi.org/10.21776/ub.industria.2021.010.03.5>.
- Hayati, N., & Lazulva, L. (2018). Preparing of Cornstarch (*Zea mays*) Bioplastic Using ZnO Metal. *Indonesian Journal of Chemical Science and Technology (IJCST)*, 1(1), 23–30. <https://doi.org/10.24114/ijcst.v1i1.10595>.
- Khazaei, N., Esmaili, M., Djomeh, Z. E., Ghasemlou, M., & Jouki, M. (2014). Characterization of new biodegradable edible film made from basil seed (*Ocimum basilicum* L.) gum. *Carbohydrate Polymers*, 102, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.062>.
- Kusumawati, D. H., & Putri, W. D. R. (2013). Karakteristik fisik dan kimia edible film pati jagung yang diinkorporasi dengan perasan temu hitam. *Jurnal Pangan Dan Agroindustri*, 1(1), 90–100. <https://jpa.ub.ac.id/index.php/jpa/article/view/9>.
- Lazuardi, G. P., & Cahyaningrum, S. E. (2013). Pembuatan dan Karakterisasi Bioplastik Berbahan Dasar Kitosan dan Pati Singkong dengan Plasticizer Gliserol (Preparation and Characterization Based Bioplastic Chitosan and Cassava Starch With Glycerol Plazticizer). *UNESA Journal of Chemistry*, 2(3), 161–166. <https://doi.org/10.26740/ujc.v2n3.p%25p>.
- Luchese, C. L., Rodrigues, R. B., & Tessaro, I. C. (2021). Cassava starch-processing residue utilization for packaging development. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 2238–2247. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.029>.
- Manrich, A., Moreira, F. K., Otoni, C. G., Lorevice, M. V., Martins, M. A., & Mattoso, L. H. (2017). Hydrophobic edible films made up of tomato cutin and pectin. *Carbohydrate Polymers*, 164, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.01.075>.
- Mohammadi Nafchi, A., Olfat, A., Bagheri, M., Nouri, L., Karim, A. A., & Ariffin, F. (2017). Preparation and characterization of a novel edible film based on *Alyssum homolocarpum* seed gum. *Journal of Food Science and Technology*, 54(6), 1703–1710. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2602-z>.
- Moko, E. M., Rahardiyani, D., Rawung, L. D., Sompotan, A. F., & Pontoan, K. A. (2023). Low-Cost Alkaline Pretreatments and Ultrafine Grinding in Nanocellulose Crystal Extraction from Giant Swamp Taro (*Crytosperma merkusii*) Processing Waste. *Egyptian Journal of Chemistry*, 66(13), 89–98. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2023.169552.7104>.
- Moro, T. M., Ascheri, J. L., Ortiz, J. A., Carvalho, C. W., & Meléndez-Arévalo, A. (2017). Bioplastics of native starches reinforced with passion fruit peel. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 1798–1808. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1944-x>.
- Mousavi, S. N., Nazarnezhad, N., Asadpour, G., Ramamoorthy, S. K., & Zamani, A. (2021). Ultrafine friction grinding of lignin for development of starch biocomposite films. *Polymers*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/polym13122024>.

- Nasution, H., Harahap, H., Al Fath, M. T., & Afandy, Y. (2018). Physical properties of sago starch biocomposite filled with Nanocrystalline Cellulose (NCC) from rattan biomass: The effect of filler loading and co-plasticizer addition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012033>.
- Nisa, M., Nuraisyah, A., & Yusuf, N. A. (2016). Formulasi Patch Kosmetik Lendir Bekicot (*Achatina fulica*) Dengan Polimer Kitosan Dan Berbagai Variasi Amilum. *Jurnal Ilmiah Manuntung*, 2(2), 233–238. <https://doi.org/10.51352/jim.v2i2.71>.
- Nugrahanto, A. D., Kurniawati, A., & Erwanto, Y. (2021). Karakteristik fisis bioplastik yang dibuat dari kombinasi pati tapioka dan kasein susu apkir. *Majalah Kulit, Karet, Dan Plastik*, 37(2), 103–114. <https://doi.org/10.20543/mkvp.v37i2.7422>.
- Nugroho, A. A., Basito, B., & Anandito, R. B. K. (2013). Kajian pembuatan edible film tapioka dengan pengaruh penambahan pektin beberapa jenis kulit pisang terhadap karakteristik fisik dan mekanik. *Jurnal Teknosains Pangan*, 2(1), 73–79. <https://jurnal.uns.ac.id/teknosains-pangan/article/download/4276/3692>.
- Nur, R. A., Nazir, N., & Taib, G. (2020). Karakteristik Bioplastik dari Pati Biji Durian dan Pati Singkong yang Menggunakan Bahan Pengisi MCC (Microcrystalline Cellulose) dari Kulit Kakao. *Gema Agro*, 25(1), 1–10. <https://doi.org/10.22225/ga.25.1.1713.01-10>.
- Nurulhasni, D. (2023). Home Made BIOPLASLITS dengan Analisis Pengaruh Rasio Gliserol dan Selulosa terhadap Kekuatan Tarik, Elongation, dan Ketebalan. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 12(1), 56–64. <https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v12i1.51464>.
- Onovo, H. O., Akano, T. T., Onyegbule, D. U., Towolawi, E. T., & Ajala, T. S. (2022). A Study of Biodegradation of Hybrid Bioplastic Films Blend from Manihot and Triticum Biopolymer. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 7(3), 30–38. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2022.7.3.2772>.
- Pongputthipat, W., Ruksakulpiwat, Y., & Chumsamrong, P. (2023). Development of biodegradable biocomposite films from poly (lactic acid), natural rubber and rice straw. *Polymer Bulletin*, 80(9), 10289–10307. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04560-0>.
- Prasteen, P., Thushyanthy, Y., Mikunthan, T., & Prabhakaran, M. (2018). Bio-plastics—An alternative to petroleum based plastics. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0401001>.
- Purnavita, S., Subandriyo, D. Y., & Anggraeni, A. (2020). Penambahan gliserol terhadap karakteristik bioplastik dari komposit pati aren dan glukomanan. *Metana*, 16(1), 19–25. <https://doi.org/10.14710/metana.v16i1.29977>.
- Rahardiyen, D., Moko, E. M., Shun, T. J., & Keong, L. C. (2023). Thermoplastic starch (TPS) bioplastic, the green solution for single-use petroleum plastic food packaging – A review. *Enzyme and Microbial Technology*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2023.110260>.
- Samalens, F., Thomas, M., Claverie, M., Castejon, N., Zhang, Y., Pigot, T., & Fernandes, S. C. (2022). Progresses and future prospects in biodegradation of marine biopolymers and emerging biopolymer-based materials for sustainable marine ecosystems. *Green Chemistry*, 24(5), 1762–1779. <https://doi.org/10.1039/D1GC04327G>.
- Schmaltz, E., Melvin, E. C., Diana, Z., Gunady, E. F., Rittschof, D., Somarelli, J. A., & Dunphy-Daly, M. M. (2020). Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environment International*, 144, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106067>.
- Sharma, D., Dhanjal, D. S., & Mittal, B. (2017). Development of edible biofilm containing cinnamon to control food-borne pathogen. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 7(1), 160–164. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2017.70122>.
- Sugiharto, A., Syarif, A., Handayani, N., & Mahendra, R. (2021). Effect of Chitosan, Clay, and CMC on Physicochemical Properties of Bioplastic from Banana Corm with Glycerol. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 10(1), 31–35. <https://doi.org/10.15294/jbat.v10i1.25323>.
- Syuhada, M., Sofa, S. A., & Sedyadi, E. (2020). The effect of cassava peel starch addition to bioplastic biodegradation based on chitosan on soil and river water media. *Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry*, 9(1), 7–13. <https://doi.org/10.14421/biomedich.2020.91.7-13>.
- Tang, K. H. D., Darwish, N. M., Alkahtani, A. M., AbdelGawwad, M. R., & Karácsony, P. (2022). Biological removal of dyes from wastewater: a review of its efficiency and advances. *Tropical Aquatic and Soil Pollution*, 2(1), 59–75. <https://doi.org/10.53623/tasp.v2i1.72>.
- Ulyarti, U., Lavlinesia, L., Surhaini, S., Lisani, L., & Nazarudin, N. (2021). Development of Yam-Starch-Based Bioplastics with the Addition of Chitosan and Clove Oil. *Makara Journal of Science*, 25(5), 71–79. <https://doi.org/10.7454/mss.v25i2.1155>.
- Wadaugsorn, K., Panrong, T., Wongphan, P., & Harnkarnsujarit, N. (2022). Plasticized hydroxypropyl

- cassava starch blended PBAT for improved clarity blown films: Morphology and properties. *Industrial Crops and Products*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114311>.
- Wahib, S. A., Da'na, D. A., & Al-Ghouti, M. A. (2022). Insight into the extraction and characterization of cellulose nanocrystals from date pits. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(3). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103650>.
- Warkoyo, W., Rahardjo, B., Marseno, D. W., & Karyadi, J. N. W. (2014). Sifat fisik, mekanik dan barrier edible film berbasis pati umbi kimpul (*Xanthosoma sagittifolium*) yang diinkorporasi dengan kalium sorbat. *Agritech*, 34(1), 72–81. <https://doi.org/10.22146/agritech.9525>.
- Widiatmono, B. R., Sulianto, A. A., & Debora, C. (2021). Biodegradabilitas Bioplastik Berbahan Dasar Limbah Cair Tahu dengan Penguat Kitosan dan Plasticizer Gliserol. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 8(1), 21–27. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2021.008.01.3>.
- Wongphan, P., Panrong, T., & Harnkarnsujarit, N. (2022). Effect of different modified starches on physical, morphological, thermomechanical, barrier and biodegradation properties of cassava starch and polybutylene adipate terephthalate blend film. *Food Packaging and Shelf Life*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100844>.
- Wu, X., Liu, P., Zhao, X., Wang, J., Teng, M., & Gao, S. (2022). Critical effect of biodegradation on long-term microplastic weathering in sediment environments: a systematic review. *Journal of Hazardous Materials*, 437. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129287>.
- Yasin, N. M., Akkermans, S., & Van Impe, J. F. (2022). Enhancing the biodegradation of (bio) plastic through pretreatments: A critical review. *Waste Management*, 150, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.004>.