

**CHARACTERISTICS OF BIOTHERMOPLASTIC COMPOSITES BASED
THERMOPLASTIC STARCH /THERMOPLASTIC GLUCOMANNAN/POLY LACTIC ACID
IN VARIATIONS OF FILLER TYPES AND CONCENTRATIONS**

**KARAKTERISTIK KOMPOSIT BIOTHERMOPLASTIK BERBASIS PATI
TERMOPLASTIS/ GLUKOMANAN TERMOPLASTIS/POLI ASAM LAKTAT
DALAM VARIASI JENIS DAN KONSENTRASI FILLER**

Putri Agnesia Siringo-Ringo¹, Bambang Admadi Harsojuwono¹, Ni Putu Suwariani¹, Amna Hartiati¹, Sri Suhartini²

¹Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Badung, Bali, Indonesia

²Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

Diterima 11 Agustus 2024 / Disetujui 28 September 2024

ABSTRACT

Biothermoplastic composites are eco-friendly materials that degrade more quickly. These composites are a mixture of biologically-based polymers that melt when heated and solidify when cooled, making them a potential solution for sustainable packaging materials. This study aims to determine the effect of various types and concentrations of fillers on the characteristics of biothermoplastic composites, as well as to identify the combination of filler type and concentration that produces the best characteristics in thermoplastic starch/thermoplastic glucomannan/polylactic acid (TPS/TPG/PLA) composites. The research used a Completely Randomized Design (CRD) factorial with the first factor being the type of filler (J), namely ZnO, Clay, and CaCO₃, while the second factor was the filler concentration (K), which was 5%, 7.5%, and 10% of the matrix material. Therefore, there were 9 treatment combinations, each repeated twice. The variables observed in this study were tensile strength, elongation at break, elasticity (Young's modulus), swelling, density, melting point, and biodegradation time. The data obtained were analyzed using variance analysis and followed by the Honest Significant Difference (HSD) test. The results showed that the type and concentration of filler had a significant influence on tensile strength, elongation at break, elasticity, swelling, density, melting point, and biodegradation time. The best biothermoplastic composite was obtained using 10% clay filler, with a tensile strength of 41.88 MPa, elongation at break of 0.68%, elasticity of 6.16 GPa, swelling of 0.48%, density of 1.01 g/cm³, a melting point of 170.05°C, and a biodegradation time of 24.5 days. The characteristics of the TPS/TPG/PLA biothermoplastic composite mostly meet SNI and international standards, except for elongation at break.

Keywords: *biothermoplastic composite, thermoplastic starch, thermoplastic glucomannan, polylactic acid, filler*

ABSTRAK

Komposit biotermoplastik, yakni material ramah lingkungan yang dapat terurai lebih cepat. Komposit ini merupakan campuran polimer berbasis bahan biologis yang meleleh saat dipanaskan dan mengeras kembali saat didinginkan, menjadikannya solusi yang potensial sebagai bahan kemasan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh dari beberapa jenis dan konsentrasi *filler* terhadap karakteristik komposit biotermoplastik, serta menentukan kombinasi jenis dan konsentrasi *filler* yang menghasilkan karakteristik

*Korespondensi Penulis :

Email: bambang.admadi@unud.ac.id

terbaik dari komposit biotermoplastik pati termoplastis/glukomanan termoplastis/poliasam laktat (TPS/TPG/PLA). Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) factorial dengan faktor pertama jenis *filler* (J) yaitu ZnO, Clay, CaCO₃ sedangkan faktor kedua yaitu konsentrasi *filler* (K) sebesar 5, 7.5 dan 10% dari bahan matrik. Oleh karena itu, terdapat 9 kombinasi perlakuan yang masing-masing diulang dua kali. Variabel yang diamati pada penelitian ini yaitu kuat tarik, perpanjangan saat putus, elastisitas, pengembangan tebal, densitas, titik leleh dan waktu biodegradasi. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan analisis keragaman dan dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Jujur (BNJ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis dan konsentrasi filler memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kuat tarik, perpanjangan saat putus, elastisitas, dan pengembangan tebal, densitas, titik leleh dan waktu biodegradasi. Komposit Biotermoplastik terbaik diperoleh oleh komposit biotermoplastik yang menggunakan *filler clay* 10% dengan nilai kuat tarik 41,88 MPa, nilai perpanjangan saat putus 0,68%, elastisitas 6,16 GPa, pengembangan tebal 0,48%, densitas 1,01 g/cm³, titik leleh 170,05°C dan waktu biodegradasi 24,5 hari. Karakteristik komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA sebagian besar telah standar SNI dan internasional, kecuali perpanjangan saat putus.

Kata kunci : komposit biotermoplastik, pati termoplastis, glukomanan termoplastis, poliasam laktat, *filler*

PENDAHULUAN

Plastik adalah bahan sintesis yang terbentuk dari produk polimerisasi sintetik atau semi-sintetik dengan sifat-sifat unik dan luar biasa (Amni et al., 2015). Plastik digunakan dalam berbagai macam aplikasi, mulai dari kemasan, botol minuman dan pipa hingga peralatan rumah tangga dan industri. Penguraian plastik konvensional di lingkungan dapat memerlukan waktu ratusan hingga ribuan tahun. Untuk mengatasi masalah tersebut maka dikembangkan plastik ramah lingkungan, salah satu cara yaitu pengembangan komposit biotermoplastik (Jambeck et al., 2015). Menurut Harsojuwono et al, (2022) komposit biotermoplastik merupakan campuran dua atau lebih polimer bahan biologis dan bahan lain yang meleleh jika dipanaskan dan mengeras kembali jika didinginkan. Komposit biotermoplastik adalah material komposit yang berbasis pada polimer yang dapat terbiodegradasi, yang sering digunakan sebagai alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan plastik sintetik berbasis dasar fosil. Salah satu komponen utama dalam biotermoplastik adalah biopolimer alami seperti pati dan bahan penguat dari sumber alami lainnya, misalnya karagenan, selulosa, atau glukomanan. Komposit biotermoplastik ini telah dikembangkan oleh beberapa peneliti sebagai bahan kemasan ramah lingkungan.

Penelitian terkait komposit biotermoplastik di Indonesia menunjukkan perkembangan yang signifikan sejak 2007 hingga 2022. Beberapa penelitian memfokuskan pada pengembangan bahan komposit dari pati singkong, ubi talas, hingga maizena dengan berbagai bahan penguat seperti gliserol, kitosan, dan serat selulosa. Sebagai contoh, Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Udayana mengembangkan bioplastik berbahan dasar pati singkong dan karagenan, yang dapat terdegradasi dalam waktu 8 hari. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi penggantian plastik sintetik, terutama dalam aplikasi kemasan dan kantong plastik (Lailiyah et al., 2012). Penelitian lain di berbagai universitas di Indonesia juga menguji berbagai formulasi dan metode pengolahan biotermoplastik untuk memperbaiki sifat mekanik dan biodegradabilitasnya. Misalnya, penelitian tentang penggunaan maizena dan glukomanan menunjukkan bahwa variasi konsentrasi polivinil alkohol (PVA) dan waktu pemanasan dapat memengaruhi kekuatan tarik dan daya biodegradasi komposit (Limbong et al., 2022).

Pengembangan komposit biotermoplastik di atas belum semuanya memenuhi SNI maupun SI. Menurut Morales et al, (2017), keberhasilan dalam mengembangkan komposit biotermoplastik sebagai bahan kemasan yang ramah lingkungan dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis dan konsentrasi filler yang digunakan. Adanya *filler* sebagai bahan penguat/pengisi akan berdampak

terhadap karakteristik komposit yang dihasilkan seperti sifat mekanik seperti kuat tarik, perpanjangan putus, *modulus young* dan sifat fisik seperti WVTR, O₂TR, pengembangan tebal, densitas, kristalinitas, titik leleh (Liu et al., 2023).

Penelitian tentang jenis dan konsentrasi *filler* yang digunakan dalam pembuatan komposit biotermoplastik yang berbahan baku pati termoplastis (TPS) yang bersifat termoset dan tidak meleleh setelah mengeras, pati termoplastik dapat dipanaskan dan didinginkan berulang kali tanpa mengubah sifat mekaniknya secara permanen) TPS berasal dari pati alami, biasanya dari tanaman seperti jagung, singkong, kentang, atau gandum, TPS juga memiliki beberapa keterbatasan seperti sifat mekanik yang lemah dan sensitivitas terhadap kelembaban, sehingga sering digunakan dalam kombinasi dengan bahan lain untuk meningkatkan kekuatannya, seperti dalam pembuatan komposit (Jumaidin et al., 2023) kemudian glukomanan termoplastis (TPG) dimana TPG merupakan glukomanan yang dimodifikasi dengan penambahan plastisizer tertentu sehingga didapatkan glukomanan yang bersifat termoplastis dan merupakan sejenis polimer berbasis glukomanan, yang merupakan polisakarida alami yang ditemukan dalam tanaman seperti porang (*Amorphophallus konjac*).

Glukomanan memiliki struktur rantai panjang yang terdiri dari glukosa dan manosa. Dalam kondisi termoplastis, glukomanan dapat dilelehkan dan dibentuk seperti termoplastik lain, setelah ditambahkan plasticizer seperti air, gliserol, atau polivinil alkohol (PVA) hal ini memungkinkan glukomanan untuk diolah menjadi produk biodegradable yang lebih fleksibel (Maulana Faizal, 2014). Dalam konteks komposit biotermoplastik, glukomanan digunakan sebagai bahan utama atau penguat untuk meningkatkan sifat mekanik, fleksibilitas, dan biodegradabilitas produk. Salah satu keunggulan dari TPG adalah kemampuannya menyerap air dalam jumlah besar, sehingga berguna dalam berbagai aplikasi kemasan biodegradable. Namun, kelembaban juga dapat menjadi kelemahan karena dapat mengurangi stabilitas mekanik material (Limbong et al., 2022). Serta poliasam laktat (PLA) yang merupakan asam hidroksi yang paling sederhana, yang memiliki atom karbon asimetris, adalah senyawa ini. Asam ini dapat diproduksi melalui fermentasi karbohidrat oleh bakteri, menghasilkan baik asam L-laktat maupun asam D-laktat (Abdullah et al., 2019).

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jenis dan konsentrasi *filler* terhadap karakteristik komposit biotermoplastik serta menentukan jenis dan konsentrasi *filler* terbaik, sehingga menghasilkan komposit biotermoplastik dari TPS, TPG dan PLA dengan karakteristik terbaik sesuai dengan SNI 7818:2014 ; SNI 7818:2016 dan SI ASTM D792-91 ; ASTM D638 ; ASTM E324.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada riset ini melibatkan tapioka dan glukomanan dari CV Nura Jaya, gliserol (Glyceryn USP) dan akuades (Merck Aquades) dari CV Brathacem, poliasam laktat (Luminy) dari CV Bandung, asam maleat anhidrat (Merck Maleic Anhydride) dari CV Sukses Makmur, ZnO (ZinClear), *Clay* (Kaolin USP) dan CaCO₃ (Omycal). Peralatan yang digunakan meliputi gelas beker (Iwaki), gelas ukur (Iwaki), cawan petri (Pyrex), pengaduk (IKA), oven (Binder) , mixer (tipe HMJ-3, rated power 400 watt, voltage 220v, frekuensi 50hz), *hotplate*, teflon diameter 20 cm (Maxim), *polybag* (Berry Global Polybag), pipet tetes (VWR), timbangan analitik (Ohaus), alat uji mekanik (ZP Recorder 50 N Imada), mikrometer sekrup (Starrertt), alat kempa panas (Hix), *melting point analyzer* (BUCHI).

Rancangan Penelitian

Penelitian ini mengaplikasikan Rancangan Acak Lengkap (RAL) factorial yang mencakup faktor

pertama yaitu jenis *filler* (J) yaitu ZnO, *Clay*, CaCO₃. Faktor kedua yaitu konsentrasi *filler* (K) sebesar 5, 7.5 dan 10% dari bahan matrik. Dengan demikian terdapat 9 perlakuan kombinasi yang dikelompokkan menjadi 2 kelompok waktu proses pembuatan komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA sehingga terdapat 18 unit percobaan. Data yang didapat dari hasil pengamatan dilakukan analisis keragaman (ANOVA) kemudian dilanjutkan dengan uji lanjut menggunakan Uji Beda Nyata Jujur (BNJ).

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini terdiri dari dua tahap pelaksanaan. Pelaksanaan penelitian diawali dengan persiapan bahan baku, pembuatan pati termoplastis dan glukomanan termoplastis serta pembuatan komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA. Adapun komposisi pembuatan komposit biotermoplastik berbasis TPS, TPG, PLA, asam maleat anhidrat (AMA) serta *filler* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi TPS, TPG, PLA, asam maleat anhidrat dan *filler* sesuai perlakuan

Perlakuan	TPS (g)	TPG (g)	PLA (g)	Asam maleat anhidrat (g)	ZnO (g)	Clay (g)	CaCO ₃ (g)	Total (g)
J1K1	37,5	12,5	50	10	5			115
J1K2	37,5	12,5	50	10	7,5			117,5
J1K3	37,5	12,5	50	10	10			120
J2K1	37,5	12,5	50	10		5		115
J2K2	37,5	12,5	50	10		7,5		117,5
J2K3	37,5	12,5	50	10		10		120
J3K1	37,5	12,5	50	10			5	115
J3K2	37,5	12,5	50	10			117,5	117,5
J3K3	37,5	12,5	50	10			10	120

Disiapkan bahan baku TPS, TPG, PLA, AMA, *Filler* dan ditimbang sesuai perlakuan, kemudian PLA dilelehkan dan diaduk pada suhu 110°C setelah leleh ditambah berturut-turut AMA, TPS, TPG dan *filler* sesuai perlakuan sambil terus diaduk hingga semuanya leleh. Setelah leleh selanjutnya campuran dituang ke alat kempa panas untuk dikempa pada suhu 80°C selama 10 menit hingga berbentuk lembaran. Setelah selesai pengempaan lembaran komposit dibiarkan dingin pada suhu kamar lalu lembaran komposit biotermoplastik diambil. Lembaran ini merupakan komposit biotermoplastik yang siap diuji karakteristiknya. Adapun parameter yang diamati pada penelitian ini adalah, kuat tarik (*tensile strength*), perpanjangan saat putus (*elongation at break*), elastisitas (*modulus young*), uji pengembangan (*swelling*), uji waktu biodegradasi (*biodegradation time*), titik leleh/melting, densitas (*density*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat Tarik (*Tensile Strength*)

Hasil dari analisis keragaman memperlihatkan bahwa perlakuan jenis dan konsentrasi *filler* serta interaksi keduanya berpengaruh sangat signifikan ($p < 0,01$) terhadap kuat tarik komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA. Nilai rata-rata kuat tarik komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA berada kisaran 21,78 - 41,88 MPa.

Tabel 2 menunjukkan nilai kuat tarik komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA tertinggi menggunakan *clay* dengan konsentrasi 10% yaitu sebesar 41,88 MPa yang tidak berbeda signifikan dengan komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan *clay* 7,5% yaitu sebesar 36,94

MPa dan ZnO dengan konsentrasi 10% yaitu sebesar 33,65 MPa. Sementara itu, nilai kekuatan tarik terendah diperoleh dari komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan CaCO₃ dengan konsentrasi 10% yaitu sebesar 21,78 MPa yang tidak berbeda signifikan dengan komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan ZnO 5%, CaCO₃ 5% dan 7,5%. Hal ini disebabkan *clay* pada konsentrasi tinggi sampai batas tertentu mampu terdistribusi dengan baik dalam matriks polimer dan meningkatkan ikatan antara *filler* dan matriks. *Clay* memiliki sifat penguatan yang efektif, sehingga meningkatkan kekakuan material dan mendistribusikan tegangan secara merata (Zhang dan Wang, 2013).

Tabel 2. Rata-rata kekuatan tarik (MPa) dari komposit bitermoplastik TPS/TPG/PLA dalam variasi jenis dan konsentrasi *filler*

Jenis	Konsentrasi		
	5%	7,5%	10%
ZnO	25,84±3,05 ^{cd}	31,17±0,57 ^{bc}	33,65±2,92 ^{abc}
<i>Clay</i>	32,53±2,96 ^{bc}	36,94±2,75 ^{ab}	41,88±1,38 ^a
CaCO ₃	28,29±0,40 ^{cd}	25,66±0,93 ^{cd}	21,78±1,34 ^d

Keterangan : Nilai indikator yang sama di belakang nilai rata-rata menunjukkan variasi yang signifikan dalam batas kesalahan 0,05% (p<0,05)

Menurut SNI 7818:2014 nilai kuat tarik minimum yang dimiliki oleh bioplastik memiliki kekuatan tarik sebesar 13,7 MPa. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, nilai kuat tarik komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA dalam riset ini telah memenuhi persyaratan SNI 7818:2014.

Perpanjangan Saat Putus (*Elongation at Break*)

Hasil dari analisis keragaman memperlihatkan bahwa perlakuan jenis dan konsentrasi *filler* serta interaksi keduanya berpengaruh sangat signifikan (p<0,01) terhadap perpanjangan putus komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA. Pada penelitian nilai perpanjangan saat putus yang dimiliki oleh komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA berkisar antara 0,68 - 1,37% yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rata-rata perpanjangan saat putus (%) dari komposit bitermoplastik TPS/TPG/PLA dalam variasi jenis dan konsentrasi *filler*

Jenis <i>Filler</i>	Konsentrasi <i>Filler</i>		
	5%	7,50%	10%
ZnO	1,36±0,0001 ^a	1,37±0,0000 ^a	1,37±0,0001 ^a
<i>Clay</i>	1,36±0,0000 ^a	1,02±0,0001 ^b	0,68±0,0001 ^c
CaCO ₃	1,37±0,0001 ^a	1,36±0,0000 ^a	1,36±0,0000 ^a

Keterangan : Nilai indikator yang sama di belakang nilai rata-rata menunjukkan variasi yang signifikan dalam batas kesalahan 0,05% (p<0,05)

Tabel 3 menunjukkan nilai perpanjangan saat putus yang lebih besar dimiliki oleh komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan *filler* ZnO dan CaCO₃ dengan tingkat konsentrasi 5%, 7,5% dan 10% serta *clay* 5% dengan nilai berkisar 1,36% – 1,37%, yang berbeda signifikan dengan lainnya, hal ini disebabkan penambahan *filler* ZnO dalam komposit biotermoplastik cenderung meningkatkan nilai perpanjangan saat putus karena ZnO memperbaiki ikatan antar komponen, mengurangi kekakuan berlebih dan meningkatkan elastisitas material. Sementara itu

komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan *clay* 10% menghasilkan nilai perpanjangan saat putus terendah dengan nilai 0,68% yang berbeda signifikan dengan lainnya. Hal ini kemungkinan disebabkan *clay* terdistribusi lebih baik ke dalam matrik sehingga meningkatkan kekakuan dan kristalinitas sehingga menurunkan perpanjangan saat putus (Zhang dan Wang, 2013). Ayu et al. (2023) menyatakan bahwa nilai perpanjangan saat material putus akan berkebalikan dengan nilai kuat tarik.

Nilai perpanjangan saat material putus pada komposit biotermoplastik merupakan aspek yang sangat krusial untuk diperhatikan mengingat nilai mekanik yang memadai akan menghasilkan komposit biotermoplastik yang lebih baik pula. Pada penelitian ini menghasilkan nilai perpanjangan saat putus komposit biotermoplastik belum memenuhi persyaratan SNI maupun Standar Internasional (SI).

Elastisitas (*Modulus Young*)

Hasil dari analisis keragaman memperlihatkan bahwa perlakuan jenis dan konsentrasi *filler* serta interaksi keduanya berpengaruh sangat signifikan ($p < 0,01$) menunjukkan pengaruh terhadap elastisitas (*modulus young*) komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA. Nilai elastisitas komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA berkisar antara 6,16 - 1,60 GPa, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Rata-rata elastisitas (GPa) komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA dalam variasi jenis dan konsentrasi *filler*

Jenis <i>Filler</i>	Konsentrasi <i>Filler</i>		
	5%	7,5%	10%
ZnO	1,91±0,22 ^{cd}	2,28±0,04 ^{cd}	2,47±0,23 ^c
<i>Clay</i>	2,39±0,22 ^c	3,62±0,30 ^b	6,16±0,26 ^a
CaCO ₃	2,06±0,04 ^{cd}	1,89±0,07 ^{cd}	1,60±0,10 ^d

Keterangan : Nilai indikator yang sama di belakang nilai rata-rata menunjukkan variasi yang signifikan dalam batas kesalahan 0,05% ($p < 0,05$)

Berdasarkan Tabel 4, nilai *modulus young* terbesar diperoleh oleh material komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan *clay* dengan konsentrasi 10% dengan nilai 6,16 GPa yang berbeda signifikan dengan lainnya. Sedangkan nilai *modulus young* terendah dihasilkan oleh komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan CaCO₃ 10% dengan nilai 1,60 GPa yang tidak berbeda signifikan dengan elastisitas dari komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan ZnO 5, dan 7,5% dan CaCO₃ 5, dan 7,5%.

Perbedaan nilai elastisitas yang signifikan pada komposit biotermoplastik dengan *filler clay* dan CaCO₃ disebabkan oleh sifat fisik dan interaksi *filler* dengan matriks. *Filler clay* pada konsentrasi tinggi cenderung meningkatkan elastisitas karena *clay* berperan sebagai penguat yang meningkatkan interaksi dengan matriks dan distribusi yang lebih merata, mengurangi keretakan internal (Hidayat et al., 2018). Sebaliknya, CaCO₃ pada konsentrasi tinggi dapat menurunkan elastisitas karena CaCO₃ dapat menyebabkan agregasi partikel dan meningkatkan kekakuan yang berlebihan, menghambat kemampuan material untuk kembali ke bentuk semula (Dang & Yoksan, 2015).

Modulus young tertinggi dari komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan *clay* dengan konsentrasi 10%, disebabkan *clay* sampai batas tertentu mampu terdistribusi dengan baik

dalam matriks polimer dan meningkatkan ikatan antara *filler* dan matrik yang meningkatkan kuat tarik (Zhang dan Wang, 2013). Desramadani et al. (2023) menjelaskan bahwa *modulus young* merupakan rasio antara kekuatan tarik dan perpanjangan saat material putus. Ini konsisten dengan hasil dari Ayu et al. (2023) yang menunjukkan kuat tarik yang meningkat dengan meningkatnya konsenrasi *filler* sampai batas tertentu, sementara itu perpanjangan saat putus menurun yang berdampak pada peningkatan *modulus young*. Ayu et al. (2023) menunjukkan bahwa *modulus young* sebanding dengan nilai kekuatan tarik, tapi akan berkebalikan dengan nilai perpanjangan saat putus.

Modulus young merupakan salah satu kriteria yang penting diperhatikan dalam pembuatan biotermoplastik. Semakin tinggi nilai *modulus young* maka komposit yang dihasilkan juga semakin baik. Pada penelitian ini nilai *modulus young* sudah memenuhi Standart International (SI) (ASTM D638) yang menyatakan nilai *modulus young* biotermoplstik minimal 200 MPa.

Pengembangan Tebal (*Swelling*)

Hasil dari analisis keragaman memperlihatkan bahwa perlakuan jenis dan konsentrasi *filler* serta interaksi keduanya berpengaruh sangat signifikan ($p < 0,01$) terhadap *swelling* komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA. Nilai pengembangan tebal (*Swelling*) komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA berkisar antara 0,37% - 0,91% seperti yang terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rata-rata pengembangan tebal (%) komposit bitermoplastik TPS/TPG/PLA dalam variasi jenis dan konsentrasi *filler*

Jenis	Konsentrasi		
	5%	7,50%	10%
ZnO	0,74±0,0003 ^{abc}	0,54±0,0011 ^{abc}	0,37±0,0000 ^c
Clay	0,86±0,0000 ^{ab}	0,62±0,0005 ^{abc}	0,48±0,0000 ^c
CaCO ₃	0,91±0,0011 ^a	0,70±0,0016 ^{abc}	0,50±0,0017 ^{bc}

Keterangan : Nilai indikator yang sama di belakang nilai rata-rata menunjukkan variasi yang signifikan dalam batas kesalahan 0,05% ($p < 0,05$)

Tabel 4 menunjukkan nilai *swelling* tertinggi diperoleh oleh komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan CaCO₃ 5% yaitu sebesar 0,91% yang berbeda signifikan dengan komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan CaCO₃ dengan konsentrasi 10% serta ZnO, dan *clay* dengan konsentrasi 10%. Sementara itu nilai *swelling* yang rendah dimiliki komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan ZnO dan *clay* dengan konsentrasi 10% berbeda signifikan dengan yang menggunakan *clay* dan CaCO₃ dengan konsentrasi 5%.

Berdasarkan Tabel 4, nilai *swelling* menunjukkan peningkatan konsentrasi *filler* semakin rendah seiring dengan meningkatnya konsentrasi *filler*. Ini terjadi karena semakin banyak konsentrasi *filler* yang digunakan, semakin banyak pori-pori tertutup akibatnya, molekul air mengalami kesulitan dalam berikatan dengan matriks (Nafchi et al., 2013).

Tabel 4 menunjukkan bahwa jenis dan konsentras *filler* berpengaruh terhadap nilai *swelling* komposit biotermoplastik. Nilai *swelling* pada biotermoplastik plastik sangat penting karena akan menentukan kestabilan dimensi serta kinerja komposit dalam lingkungan basah atau kontak dengan air. Oleh sebab itu nilai *swelling* harus memenuhi standar yang telah ditetapkan. Berdasarkan SNI 7188.7 : 2016 nilai maksimal untuk *swelling* biotermoplastik adalah 99% dan menurut JIS Z 1707 nilai *swelling* biotermoplastik adalah 70%. Pada penelitian ini komposit biotermoplastik sudah memenuhi standar SNI maupun Standar Internasional (SI).

Titik Leleh (*Melting Point*)

Hasil dari analisis keragaman memperlihatkan bahwa perlakuan jenis dan konsentrasi *filler* serta interaksi keduanya berpengaruh sangat signifikan ($p < 0,01$) terhadap titik leleh komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA. Titik leleh komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA berkisar antara 157,70 - 193,05°C, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Rata-rata titik leleh/*Melting Point* (°C) komposit bitermoplastik TPS/TPG/PLA dalam variasi jenis dan konsentrasi *filler*

Jenis	Konsentrasi		
	5%	7,5%	10%
ZnO	169,75±0,49 ^c	183,00±1,27 ^b	193,05±0,35 ^a
Clay	164,70±0,57 ^d	167,10±1,13 ^{cd}	170,05±0,35 ^c
CaCO ₃	157,70±0,85 ^e	159,95±0,21 ^e	162,05±1,06 ^e

Keterangan : Nilai indikator yang sama di belakang nilai rata-rata menunjukkan variasi yang signifikan dalam batas kesalahan 0,05% ($p < 0,05$)

Tabel 6 memperlihatkan bahwa nilai komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan ZnO dengan konsentrasi 10% mempunyai titik leleh tertinggi yaitu 193,05°C yang berbeda signifikan dengan lainnya. Sementara itu, komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan CaCO₃ dengan konsentrasi 5 hingga 10% mempunyai titik leleh yang rendah yaitu 157,70 – 162,05°C. Menurut Sudirman et al. (2002), semakin besar berat molekul zat aditif yang ditambahkan maka titik lelehnya juga semakin rendah, karena berat molekul yang tinggi menyebabkan mobilitas polimernya semakin meningkat. Titik leleh (*Melting Point*) merupakan titik suatu bahan mulai leleh dan habis meleleh ketika diberikan suhu tertentu (Fibriyani et al., 2017).

Pengujian titik leleh pada komposit biotermoplastik perlu dilakukan untuk mengetahui pengaturan suhu yang tepat sesuai dengan tujuan dibuatnya dan aplikasi komposit biotermoplastik nantinya. Menurut Standar Internasional ASTM E324 nilai titik leleh komposit bioplastik berkisar antara 30-250°C. Dengan itu nilai titik leleh komposit biotermoplastik pada penelitian ini sudah memenuhi standar.

Densitas (*Density*)

Hasil dari analisis keragaman memperlihatkan bahwa perlakuan jenis dan konsentrasi *filler* serta interaksi keduanya berpengaruh sangat signifikan ($p < 0,01$) terhadap nilai densitas komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA. Nilai densitas yang dihasilkan berkisar antara 1,01 - 1,94 g/cm³, seperti yang tertera pada Tabel 7.

Tabel 7. Rata-rata densitas/*Density* (g/cm³) komposit bitermoplastik TPS/TPG/PLA dalam variasi jenis dan konsentrasi *filler*

Jenis <i>Filler</i>	Konsentrasi <i>Filler</i>		
	5%	7,5%	10%
ZnO	1,94±0,05 ^a	1,89±0,01 ^{de}	1,52±0,03 ^b
Clay	1,31±0,00 ^{bcd}	1,10±0,07 ^{cd}	1,01±0,00 ^e
CaCO ₃	1,42±0,16 ^{bc}	1,29±0,03 ^{bcd}	1,20±0,08 ^{cde}

Keterangan : Nilai indikator berbeda di belakang nilai rata-rata menunjukkan variasi yang signifikan dalam batas kesalahan 0,05% ($p < 0,05$)

Tabel 7 menunjukkan nilai komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang memakai ZnO 5% mempunyai densitas tertinggi yaitu 1,94 g/cm³ yang berbeda signifikan dengan yang lainnya, hal ini

dikarenakan ZnO memiliki densitas yang relatif tinggi serta kecenderungan untuk berinteraksi kuat dengan matriks polimer, yang meningkatkan kekompakan material. Penambahan ZnO juga dapat meningkatkan kristalinitas PLA, yang berkontribusi terhadap peningkatan densitas keseluruhan komposit (Darni et al., 2014).

Berdasarkan Tabel 4, komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan *clay* 10% memiliki nilai densitas terendah yaitu $1,01 \text{ g/cm}^3$ yang tidak berbeda signifikan dengan densitas dari komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan ZnO 7,5%, dan CaCO_3 10%. Meskipun *clay* juga memiliki densitas yang tinggi, distribusi partikel *clay* yang kurang merata dan kemungkinan pembentukan pori-pori dalam matriks polimer dapat mengurangi densitas komposit secara keseluruhan. Selain itu, interaksi yang lebih lemah antara *clay* dan matriks polimer TPS/TPG/PLA dibandingkan dengan ZnO dapat menyebabkan penurunan densitas. Morales et al. (2017) menjelaskan bahwa komposit yang mempunyai kristalinitas dan homogenitas yang tinggi cenderung memiliki densitas yang tinggi. Densitas merupakan salah satu parameter fisis dari suatu bahan yang akan menunjukkan kerapatan dari bahan tersebut.

Semakin tinggi nilai kerapatan komposit biotermoplastik, maka semakin baik pula nilai kuat tariknya (Darni et al., 2014). Nilai SNI untuk densitas bioplastik menurut Standart Internasional (SI) ASTM D792-91 nilai densitas yang baik untuk komposit biotermoplastik adalah 0,91-0,925, sehingga nilai densitas biotermoplastik belum memenuhi standar yang telah ada.

Biodegradasi (*Degradation Time*)

Hasil dari analisis keragaman memperlihatkan bahwa perlakuan jenis dan konsentrasi *filler* serta interaksi keduanya berpengaruh sangat signifikan ($p < 0,01$) terhadap biodegradasi komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA. Biodegradasi komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang diperoleh berkisar 17,50 - 24,50 hari, seperti yang tertera pada Tabel 8.

Tabel 8. Rata-rata biodegradasi (hari) komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA dalam variasi jenis dan konsentrasi *filler*

Jenis	Konsentrasi		
	5%	7,5%	10%
ZnO	$18,000 \pm 0,00^{de}$	$19,000 \pm 1,41^{de}$	$20,500 \pm 0,71^{bcd}$
<i>Clay</i>	$21,000 \pm 0,00^{bc}$	$22,500 \pm 0,71^{ab}$	$24,500 \pm 0,71^a$
CaCO_3	$17,500 \pm 0,71^e$	$19,000 \pm 0,00^{cde}$	$17,500 \pm 0,71^e$

Keterangan : Nilai indikator yang sama di belakang nilai rata-rata menunjukkan variasi yang signifikan dalam batas kesalahan 0,05% ($p < 0,05$)

Tabel 8 menunjukkan bahwa waktu degradasi yang pendek yaitu 17,50 hari dimiliki oleh komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan CaCO_3 5 dan 10% yang tidak berbeda signifikan dengan waktu biodegradasi dari komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan CaCO_3 7,5%, ZnO 5% dan 7,5%. Sementara itu komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan *clay* 10% mempunyai waktu biodegradasi terlama yaitu 24,50 hari yang tidak berbeda signifikan dengan waktu biodegradasi komposit biotermoplastik TPS/TPG/PLA yang menggunakan *clay* 7,5%.

Biodegradasi komposit biotermoplastik ditandai dengan terbentuknya pori atau patahan dari sampel akibat aktifitas mikroorganisme di dalam tanah. Menurut standar bioplastik internasional (ASTM5336), plastik PLA dari Jepang dan PCL dari Inggris memerlukan waktu 60 hari untuk terurai secara keseluruhan (100%). Sementara itu ASTM D638 menentukan waktu biodegradasi komposit biotermoplastik maksimal 60 hari. Pada penelitian ini, biodegradasi membutuhkan waktu 17-25 hari.

Maka dari itu komposit bitermoplastik pada riset ini telah memenuhi kriteria standar yang ditetapkan.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Kesimpulannya adalah jenis dan konsentrasi serta interaksi keduanya berpengaruh sangat signifikan terhadap nilai kuat tarik (*tensile strength*), perpanjangan saat putus (*elongation at break*), elastisitas (*modulus young*), pengembangan tebal (*swelling*), densitas (*density*), titik leleh (*melting point*) dan waktu biodegradasi (*degradation time*). Komposit bitermoplastik TPS/TPG/PLA menggunakan *clay* 10% menghasilkan karakteristik terbaik dengan nilai kuat tarik (*tensile strength*) 41,88 MPa, nilai perpanjangan saat putus (*elongation at break*) 0,68%, elastisitas (*modulus young*) $6,16 \pm 0,26$ GPa, pengembangan tebal (*swelling*) 0,48%, densitas (*density*) $1,01 \text{ g/cm}^3$, titik leleh (*melting point*) $170,05^\circ\text{C}$ dan waktu biodegradasi (*biodegradation time*) 24,50 hari. Selain itu diinformasikan bahwa karakteristik kuat tarik (*tensile strength*), elastisitas (*modulus young*), pengembangan tebal (*swelling*), titik leleh (*melting point*), densitas dan waktu biodegradasi sudah memenuhi standar SNI maupun SI. Sementara itu, perpanjangan saat putus belum memenuhi standar yang telah ditetapkan.

Saran

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan komposit bitermoplastik yang ramah lingkungan dengan karakteristik mekanik dan fisik yang unggul, khususnya pada komposisi TPS/TPG/PLA dengan penambahan *clay* 10%. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan komposit bitermoplastik dengan penambahan *filler* lain guna meningkatkan karakteristik material, terutama dalam hal pengembangan tebal atau *swelling*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. H. D., Fikriyyah, A. K., Putri, O. D., dan Puspa Asri, P. P. 2019. Fabrication and Characterization of Poly Lactic Acid (PLA)-Starch Based Bioplastic Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 553, 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/553/1/012052>. Diakses pada November 2023.
- Amni, C., Marwan, M., dan Mariana, M. 2015. Pembuatan Bioplastik Dari Pati Ubi Kayu Berpenguat Nano Serat Jerami dan ZnO. *Jurnal Litbang Industri*, 5(2), 91. <https://doi.org/10.24960/jli.v5i2.670.91-99>. Diakses pada November 2023.
- Ayu, N., Jumiati, E., dan Husnah, M. 2023. Analisis Uji Mekanik Bioplastik Berbahan Pati Tepung Sagu- Kitosan Dan Sorbitol. *Journal Online of Physics*, 8(3), 47–50. <https://doi.org/10.22437/jop.v8i3.23332>. Diakses pada November 2023.
- Dang, K. M., dan Yoksan, R. 2015. Development of thermoplastic starch blown film by incorporating plasticized chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 115, 575–581. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.09.005>. Diakses pada November 2023.
- Darni, Y., Sitorus, T. M., dan Hanif, M. 2014. Produksi Bioplastik dari Sorgum dan Selulosa Secara Termoplastik Thermoplastic Processing of Sorghum and Cellulose to Produce Bioplastics. *Rekayasa Kimia Dan Lingkungan*, 10(2), 55–62.
- Fibriyani, D. 2017. Pengolahan Onggok Singkong Sebagai Plastik Biodegradable Menggunakan Plasticizer Gliserin Dari Minyak Jelantah. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 6(2).

<https://doi.org/10.17728/jatp.195>. Diakses pada November 2023.

- Harsojuwono, B. A., Arnata, I. W., Hartiati, A., Setiyo, Y., Hatiningsih, S., dan Suriati, L. 2022. The Improvement of the Modified StarchGlucomannan—Polyvinyl Alcohol Biothermoplastic Composite Characteristics With Polycaprolactone and Anhydride Maleic Acid. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6(4), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.844485>. Diakses pada November 2023.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>. Diakses pada November 2023.
- Lailiyah, Q., Lailiyah, Q., Baqiya, M. A., Darminto, D. 2012. Pengaruh Temperatur dan Laju Aliran Gas CO₂ pada Sintesis Kalsium Karbonat Presipitat dengan Metode Bubbling. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 1(1), B6–B10. http://ejurnal.its.ac.id/index.php/sains_seni/article/view/287%0Ahttps://ejurnal.its.ac.id. Diakses pada November 2023.
- Limbong, S. F., Harsujuwono, B. A., dan Hartiati, A. 2022. Pengaruh Konsentrasi Polivinil Alkohol dan Lama Pengadukan pada Proses Pemanasan terhadap Karakteristik Komposit Biotermoplastik Maizena dan Glukomanan. *Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian Agrotechno*, 7(1), 37–46.
- Liu, C., Wang, R. R., Ho, I., Kong, Z. J., Williams, C., Babu, S., Joslin, C. 2023. Toward online layer-wise surface morphology measurement in additive manufacturing using a deep learning-based approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(6), 2673–2689. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01933-0>. Diakses pada November 2023.
- Maulana Faizal. 2014. *Pengaruh Komposisi Glukomanan-Tapioka Terhadap Karakteristik Biopolimer Sebagai Plastik Ramah Lingkungan*. Institus Teknologi Sepuluh November.
- Morales, A., Güemes, A., Fernandez-Lopez, A., Carcelen Valero, V., dan De La Rosa Llano, S. 2017. Bamboo–Polylactic Acid (PLA) Composite Material for Structural Applications. *Materials*, 10(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/ma10111286>. Diakses pada November 2023.
- Nafchi, A. M., Nassiri, R., Sheibani, S., Ariffin, F., dan Karim, A. A. 2013. Preparation and characterization of bionanocomposite films filled with nanorod-rich zinc oxide. *Carbohydrate Polymers*, 96(1), 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.055>. Diakses pada November 2023.
- Sudirman, Aloma, K. K., Gunawan, I., Handayani, A., dan Hertinvyana, E. 2002. Sintesis Dan Karakterisasi Komposit Polipropilena/Serbuk Kayu Gergaji. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 4(1), 20–25.
- Zhang, L., Wang, Z. 2013. Effect Of Filler Types And Contents On The Mechanical Properties Of Biocomposite Materials. *Journal Of Materials Science*, 48(6), 2108–2117.