



Artikel Penelitian

Sifat Mekanis dan Termal PLA dengan *Filler* TiO₂ dan ZnO

Syaiful Ahsan¹, Robiatul Diniyah¹, Muhamad Firel Firmana¹

¹ Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta., Jl Letjend Suprpto No 26, JakartaTimur, 10510

INFORMASI ARTIKEL

Diterima : 23 September 2021
 Direvisi : 08 Februari 2022
 Diterbitkan : 21 Februari 2022

KATA KUNCI

filler, *polylactic acid*, sifat mekanis, sifat termal

KORESPONDENSI

E-mail Author Korespondensi:
syaiful-ahsan@kemenperin.go.id

E-mail Co-Author:
robiatuldini@gmail.com
muhamadfirelfirmana@gmail.com

A B S T R A K

Plastik *biodegradable* merupakan tipe plastik yang tersusun atas struktur yang mudah terdegradasi oleh mikroorganisme. Salah satu jenis plastik tersebut yang juga sering dikategorikan sebagai bioplastik karena berasal dari bahan alami adalah poliasam laktat atau *polylactic acid* (PLA). PLA memiliki monomer asam laktat dari bahan baku terbarukan. Plastik *biodegradable* belum diproses secara massal dan digunakan sehari-hari secara luas karena memiliki keterbatasan sifat yang belum sesuai untuk menggantikan plastik konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan *filler* mineral TiO₂ dan ZnO pada PLA. *Filler* TiO₂ ditambahkan ke dalam matriks PLA sebanyak 1,0%; 1,5%; 2,0% sedangkan ZnO sebanyak 1,5%; 3,0%; dan 4,5% dari massa campuran, dengan massa PLA yang digunakan tetap sebesar 3 gram. Pencampuran PLA dengan *filler* mineral dilakukan dengan menggunakan metode *solvent casting*. Proses tersebut melalui beberapa tahap yaitu pelarutan polimer dan pendispersian *filler*, pencetakan dalam cawan petri, dan pengeringan di lemari asam. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan TiO₂ dan ZnO terhadap sifat mekanis dan sifat termal menggunakan *universal testing machine* (UTM) dan *thermogravimetric analysis* (TGA). Diperoleh hasil bahwa TiO₂ dapat meningkatkan stabilitas termal PLA. Nilai T_{d5%} naik hingga 81°C dan T_{d10%} naik hingga 9°C. Di lain pihak ZnO menurunkan stabilitas termal PLA dengan menurunkan T_{d5%} hingga 34°C dan T_{d10%} hingga 61°C. Dari hasil uji tarik diketahui bahwa ZnO meningkatkan kekuatan dan keuletan (masing-masing hingga 17% dan 76%) namun menurunkan kekakuan PLA hingga 19%.

PENDAHULUAN

Munculnya sampah plastik merupakan masalah yang melibatkan seluruh negara di dunia mengingat jumlah produksi dan konsumsi plastik yang besar. Plastik konvensional disintesis dengan bahan dasar gas alam dan minyak bumi sehingga membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk proses degradasinya (Harunsyah dkk., 2017). Salah satu solusi yang diusahakan adalah dengan mengembangkan plastik ramah lingkungan dari sumber daya terbarukan yang mampu terdegradasi dalam waktu yang relatif singkat.

Plastik *biodegradable* tersusun atas struktur yang relatif mudah terdegradasi oleh mikroorganisme. Salah satu jenis plastik tersebut adalah poliasam laktat atau *polylactic acid* (PLA) yang juga sering dikategorikan sebagai bioplastik karena berasal dari bahan alami. PLA mendapat perhatian besar untuk diaplikasi sebagai bahan kemasan karena sifatnya mudah terurai (Jamshidian dkk., 2010). Poliasam laktat adalah polimer termoplastik yang diperoleh dari bahan baku terbarukan dan aman bagi lingkungan maupun ekologi. Plastik jenis ini dapat diusulkan sebagai pengganti

plastik berbasis minyak bumi. Kekuatan dan kekakuannya yang tinggi memungkinkan aplikasi PLA pada berbagai industri misalnya untuk dijadikan biokomposit dengan menggunakan berbagai macam proses seperti ekstrusi, *injection molding*, pemintalan, *compression molding*, dan *thermoforming*. Di sisi lain aplikasi potensial dari PLA sangat dibatasi oleh rendahnya ketangguhan dan deformasi patah. Hal ini dapat ditingkatkan melalui metode-metode misalnya kopolimerisasi, *polymer blending*, dan penambahan aditif seperti *plasticizer* ataupun *filler*. *Plasticizer* ester sitrat, tributil sitrat, atau dietil-bishidroksi-metil malonat yang ditambahkan dapat meningkatkan ketangguhan dan keuletan serta menurunkan temperatur transisi kaca (Greco dkk., 2019). Di samping itu kekurangan dari plastik jenis ini adalah kerapuhan dan viskositas lelehan rendah sehingga cukup sulit untuk diproses lebih lanjut (Harunsyah dkk., 2017). Kekurangan PLA dapat diatasi dan diatur dengan menambahkan *filler* dan menggunakan kondisi proses yang sesuai (Marra dkk., 2016).

TiO₂ atau titanium dioksida adalah bahan semikonduktor yang digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi seperti katalis, sel surya, kosmetik dan lain-lain. Hal ini



disebabkan titanium dioksida mempunyai sifat-sifat seperti stabilitas tinggi, ekonomis, serta tidak beracun (Santana-Aranda dkk., 2005). Pencampuran nanopartikel TiO₂ dengan PLA dilakukan oleh Salahuddin dkk. (2019). Diketahui bahwa aglomerasi TiO₂ dapat terjadi di dalam matriks PLA. Agregasi ini dapat mengurangi bidang antarmuka antara rantai polimer dan TiO₂ yang mengarah pada penurunan sifat yang tidak diharapkan. Pencampuran matriks PLA dengan *filler* TiO₂ dilakukan untuk uji sifat mekanis yang menghasilkan nilai kekuatan tarik, *elongation at break*, dan modulus young. Semakin banyak TiO₂ yang ditambahkan menghasilkan penurunan kekuatan tarik dan *elongation at break*. Dari nilai modulus elastisitas diamati bahwa matriks PLA mempertahankan kekakuan dan sifat rapuh dengan kandungan 10 % wt TiO₂. Dalam sifat termal, temperatur dekomposisi PLA dengan campuran TiO₂ bernilai lebih tinggi daripada PLA murni. *Filler* TiO₂ meningkatkan temperatur *onset* dan temperatur puncak PLA yang berarti lebih sulit untuk terdegradasi. Matriks PLA yang dicampurkan TiO₂ sebanyak 20 wt% menghasilkan temperatur dekomposisi PLA yang lebih rendah (Athanasoulia dkk., 2017).

Seng oksida (ZnO) dapat dimanfaatkan sebagai *filler* untuk meningkatkan sifat fisik dan sifat mekanis plastik. Senyawa oksida ini merupakan mineral atau bahan anorganik antibakteri dan bersifat konduktif transparan yang telah banyak diteliti (Vasile dkk., 2017). Umumnya senyawa ZnO berbentuk serbuk putih, hampir tidak larut di dalam air ataupun etanol namun larut di dalam asam. Seng oksida banyak digunakan dalam produk perawatan gigi sebagai semen putih. Seng oksida berwarna putih, tidak transparan, toksisitas yang rendah, dan harganya murah. Seng merupakan unsur yang penting di dalam tubuh manusia karena merupakan komponen dari berbagai enzim (Darvell, 2018). Pada aplikasi plastik sebagai bahan pengemas, ZnO dipakai sebagai bahan pengisi karena sifatnya yang aman dikonsumsi, mudah terurai, dan memiliki sifat antimikroba. Dalam sifat antimikroba pada kemasan makanan, ZnO dapat berinteraksi dengan produk pangan untuk mengurangi pertumbuhan mikroorganisme yang ada pada permukaan bahan makanan (Kanmani dan Rhim, 2014).

ZnO digunakan sebagai *filler* bersama lignin pada penelitian Klapiszewskia dkk. (2019) sebagai bahan campuran untuk polietilena (PE). Polimer PE yang mengandung 5% massa ZnO-lignin dengan kandungan lignin berbeda-beda disiapkan dengan *single-screw extruder*. Penambahan seng oksida meningkatkan stabilitas termal campuran *filler* ZnO-lignin. Sementara itu pengujian mekanis menunjukkan kenaikan dua kali lipat pada kekuatan tekan campuran PE dan *filler* ZnO-lignin dengan rasio massa ZnO-lignin 1:5.

Seng oksida atau *zinc oxide* atau ZnO yang dijadikan *filler* untuk bioplastik juga dapat menaikkan kekuatannya (Syamsul dkk., 2019) dan modulus Young serta *stress at yield* (Marra dkk., 2016). Menurut Marra dkk. (2016), penambahan ZnO 1%, 3%, dan 5% pada PLA dengan menggunakan ekstruder dapat meningkatkan kekuatan tarik PLA sebanyak 4,54%, 2,27%, dan 9,10%. Hasil penelitian dari Syamsul dkk. (2019) menunjukkan penambahan 3% ZnO pada bioplastik berbahan pati jagung meningkatkan kekuatan tarik sebesar 31,7%.

Pencampuran PLA dengan *filler* dilakukan dengan berbagai cara seperti *melt processing* dan *solvent casting*. Metode *solvent casting* digunakan untuk pencampuran dengan menggunakan sedikit bahan baku secara sederhana (Takkalkar dkk., 2019). Pelarut yang dapat digunakan untuk melarutkan PLA di antaranya aseton, benzena, kloroform, atau etil asetat (Wypych, 2016). Kloroform baik digunakan sebagai pelarut karena sifatnya yang mudah menguap. Setelah dituang dan dicetak pada wadah cawan petri, kloroform pada campuran larutan PLA/ZnO akan menguap.

Berdasarkan uraian tersebut maka penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh *filler* TiO₂ terhadap sifat termal PLA, serta menentukan pengaruh *filler* ZnO terhadap sifat termal dan mekanis PLA.

METODE

Prosedur Penelitian

Penelitian dimulai dari studi literatur, preparasi alat dan bahan, percobaan pendahuluan, pelarutan PLA ke dalam kloroform, pencampuran ZnO ke dalam PLA yang telah dilarutkan dengan kloroform, pencampuran TiO₂ ke dalam PLA yang telah dilarutkan dengan kloroform, pencetakan sampel (*solvent casting*) ke dalam cawan petri, penguapan dalam lemari asam, pengambilan film PLA murni, film PLA/ZnO, dan film PLA/TiO₂, pengujian TGA terhadap semua sampel, pengujian tarik dengan UTM terhadap sampel film PLA/ZnO, pengujian XRD untuk serbuk TiO₂, analisis data, dan kesimpulan.

Alat

Peralatan pengujian terdiri atas:

1. UTM (*universal testing machine*) Ibertest 5kN
Sampel diuji dengan standar ASTM D882-10. Jumlah spesimen yang diuji sebanyak 5 spesimen tiap sampel dengan ukuran 2×10 cm. Ketebalan spesimen uji kurang dari 1 mm. Spesimen uji dikondisikan terlebih dahulu pada 23±2°C dan dengan kelembapan relatif 50±10% selama minimal 40 jam.
2. TGA (*thermogravimetric analysis*) TA50
Sampel diuji dengan standar ASTM E1131-08 dengan massa 10-20 mg. Sampel diletakkan di dalam wadah

DOI: [10.52330/jtm.v20i1.43](https://doi.org/10.52330/jtm.v20i1.43)

platina HT kemudian dipanaskan dengan rentang suhu 30–750°C. Laju alir gas nitrogen 50 ml/menit.

3. XRD (*x-ray diffraction*) Rigaku-SmartLab

Bahan

Bahan penelitian terdiri atas:

1. PLA (*polylactic acid*) atau poliasam laktat
2. CHCl₃ (kloroform)
3. TiO₂ (titanium dioksida)
4. ZnO (seng oksida)

Variabel Penelitian

Variabel-variabel dalam penelitian terdiri atas:

1. variabel tetap: massa PLA 3 gram, massa kloroform 50 gram, waktu pelarutan PLA 90 menit, waktu pendispersian ZnO 30 menit, waktu pencampuran PLA/TiO₂ 1 jam, waktu pencampuran PLA/ZnO 1 jam, diameter cawan petri untuk pencetakan film 15 cm;
2. variabel bebas: komposisi kedua jenis *filler* seperti yang ditampilkan di dalam Tabel 1.

Tabel 1 Komposisi PLA, TiO₂, dan ZnO

Sampel	PLA		TiO ₂		ZnO	
	Massa, g	%	Massa, g	%	Massa, g	%
1	3	-	-	-	-	-
2	3	1,0	0,0309	-	-	-
3	3	1,5	0,0457	-	-	-
4	3	2,0	0,0612	-	-	-
5	3	-	-	-	1,5	0,0457
6	3	-	-	-	3,0	0,0928
7	3	-	-	-	4,5	0,1413

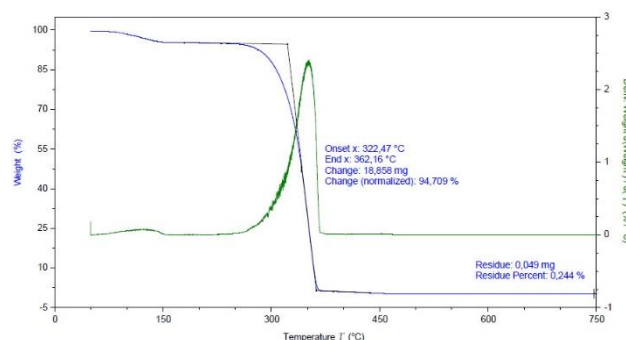
HASIL DAN DISKUSI

Pengaruh TiO₂ terhadap Sifat Termal PLA

Karakterisasi dengan *x-ray diffraction* (XRD) dilakukan terlebih dahulu untuk melakukan identifikasi struktur kristal dari sampel *filler* TiO₂. Sampel berupa serbuk diuji dengan menggunakan XRD merk Rigaku-SmartLab dengan metode Bragg Bentano dalam kondisi suhu 18-25 °C dan kelembapan relatif di bawah 65%. Diperoleh hasil bahwa sampel mineral jenis TiO₂ terkonfirmasi dengan fase kristal *anatase* sebesar 86,5%, *rutile* 6,51%, dan sisanya merupakan Fe dan Mn.

Karakterisasi sifat termal dilakukan dengan *thermogravimetric analysis* (TGA). Salah satu aplikasi dari TGA adalah evaluasi stabilitas termal material polimer. Untuk itu, beberapa variabel yang diperoleh dari kurva TGA diukur pada kondisi sama untuk semua sampel. Variabel-variabel tersebut umum digunakan untuk menunjukkan stabilitas termal polimer yang meliputi: *Ti* atau *Tonset*, yaitu temperatur dimulainya dekomposisi atau

penurunan massa signifikan; *Tmax*, yaitu temperatur saat laju hilang massa maksimum; *T_{d1%}*, yaitu temperatur saat hilang massa 1%; dan *T_{d5%}*, yaitu temperatur saat hilang massa 5% (Yang, 2018). Gambar 1 menunjukkan termogram hasil pengujian sampel PLA dengan penambahan TiO₂ sebesar 1,0%wt. Nilai *Tonset* diperoleh dari termogram tersebut sedangkan nilai *T_{d5%}* dan *T_{d10%}* diperoleh dari *datasheet* hasil pengujian berupa tabel massa dan persentase massa sebagai fungsi dari temperatur yang merupakan bagian tak terpisahkan dari gambar termogram.



Gambar 1 Hasil Uji TGA Sampel PLA/TiO₂ 1,0%

Tabel 2 Hasil uji TGA film PLA dan film PLA/TiO₂

Sampel	T _{d5%} (°C)	T _{d10%} (°C)	T _{onset} (°C)
PLA	173,95	298,88	318,57
PLA/TiO ₂ 1,0%	234,16	293,92	322,47
PLA/TiO ₂ 1,5%	255,12	307,88	332,52
PLA/TiO ₂ 2,0%	239,43	293,35	325,59

Tabel 2 menunjukkan beberapa variabel indikator stabilitas termal polimer. Temperatur saat hilang massa 1% (*T_{d1%}*) tidak ditentukan karena terjadi degradasi pada temperatur di bawah 150°C akibat penguapan pelarut yang menyebabkan kehilangan massa lebih dari 4% pada semua sampel film PLA dan film PLA/TiO₂. Berdasarkan tabel tersebut dapat diamati bahwa nilai *T_{d5%}* dan *Tonset* cenderung meningkat sedangkan nilai *T_{d10%}* cenderung fluktuatif. Kecenderungan peningkatan nilai *T_{d5%}* dan *Tonset* menunjukkan bahwa *filler* TiO₂ menyebabkan peningkatan stabilitas termal PLA. TiO₂ sebagai oksida logam kemungkinan menyerap sebagian kalor yang seharusnya diberikan pada PLA saat pemanasan. Hal berbeda dihasilkan dari penelitian Nakayama dan Hayashi (2007) yang menunjukkan bahwa campuran PLA dengan nanopartikel TiO₂ sebesar 1%, 5%, dan 10% menunjukkan penurunan nilai *T_{d5%}* dan *Tonset* jika dibandingkan dengan PLA murni. Dengan demikian partikel berukuran besar (*bulk*) yang digunakan pada penelitian ini memberikan efek yang berbeda dengan nanopartikel.

Pengaruh ZnO terhadap Sifat Termal PLA

Tabel 3 menunjukkan nilai *T_{d5%}*, *T_{d10%}*, dan *Tonset* hasil uji TGA pada film PLA dan film PLA/ZnO. Berdasarkan tabel 3 dapat diamati bahwa baik nilai *T_{d5%}*, *T_{d10%}*, maupun

Tonset cenderung mengalami penurunan dengan penambahan *filler* ZnO ke dalam matriks PLA. Kecenderungan penurunan nilai variabel-variabel tersebut memperlihatkan bahwa ZnO menyebabkan turunya stabilitas termal PLA.

Tabel 3 Hasil uji TGA film PLA dan film PLA/ZnO

Sampel	T _{d5%} (°C)	T _{d10%} (°C)	T _{onset} (°C)
PLA	173,95	298,88	318,57
PLA/ZnO 1,5%	143,36	238,91	261,02
PLA/ZnO 3,0%	141,10	237,83	259,69
PLA/ZnO 4,5%	140,19	238,04	261,98

Berdasarkan fakta di atas dapat dikatakan bahwa ZnO sebagai oksida logam kemungkinan mempercepat penyerapan kalor pada PLA saat pemanasan. Hal ini bisa saja merugikan jika plastik PLA digunakan pada temperatur di atas 100°C. Perilaku ZnO yang berbeda dilaporkan dari penelitian Chen dkk. (2018) yang menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO yang dibuat bersifat hidrofobik justru dapat meningkatkan stabilitas termal resin *unsaturated polyester*. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa ukuran *filler* dan jenis matriks mempengaruhi stabilitas termal.

Dalam penelitiannya, Rahmanian dkk. (2015) melaporkan bahwa campuran nanopartikel ZnO-PVA (polivinil alkohol) memiliki stabilitas termal yang rendah akibat rendahnya berat molekul dari polimer tersebut. Di lain pihak, Lizundia dkk. (2019) menambahkan ZnO nanopartikel dengan konsentrasi 0,2; 0,5; 1,0; 5,0; dan 10% ke dalam PLA. Diperoleh penurunan nilai T_{d5%}, T_{d10%} dan T_{max} pada setiap kenaikan persentase ZnO yang ditambahkan. Hal ini disebabkan karena ZnO bertindak sebagai katalis yang mempercepat depolimerisasi PLA dengan memicu reaksi transesterifikasi antarmolekul PLA saat dipanaskan. Karena reaksi katalisis tersebut terjadi pada permukaan ZnO, jumlah antarmuka ZnO-PLA akan menentukan perilaku degradasi termal campuran tersebut. Dengan demikian nanopartikel yang memiliki luas permukaan lebih besar akan menghasilkan degradasi termal yang lebih besar dibanding ZnO berukuran mikro ataupun berukuran besar (*bulk*).

Pengaruh ZnO terhadap Sifat Mekanis PLA

Tabel 4 menampilkan tiga jenis variabel hasil uji tarik film PLA dan film PLA/ZnO. Ketiga variabel tersebut meliputi kekuatan tarik (KT), modulus Young (MY) sebagai ukuran kekakuan, dan *elongation at break* (EB) sebagai ukuran keuletan.

Tabel 4 Hasil uji tarik film PLA dan film PLA/ZnO

Sampel	KT (MPa)	MY (GPa)	EB (%)
PLA	36,51	5,38	0,38
PLA/ZnO 1,5%	41,12	4,60	0,54
PLA/ZnO 3,0%	42,69	4,94	0,52
PLA/ZnO 4,5%	40,77	4,35	0,67

Dari tabel 4 dapat diamati bahwa penambahan ZnO ke dalam PLA menyebabkan nilai kekuatan tarik dan *elongation at break* cenderung meningkat sedangkan nilai modulus Young cenderung menurun. Ini artinya ZnO menyebabkan peningkatan kekuatan dan keuletan namun menyebabkan penurunan kekakuan matriks PLA. Peningkatan kekuatan PLA oleh *filler* ZnO dapat diartikan bahwa dispersi *filler* jenis tersebut cukup baik untuk mampu menahan deformasi plastis yang terjadi saat penarikan.

Penambahan ZnO sebanyak 1%, 3%, dan 5% cenderung meningkatkan kekakuan PLA yang diukur dari modulus Young serta kekuatan PLA yang diukur baik dari *stress at yield* maupun dari *stress at break* (Marra dkk., 2016). Hasil penelitian Chen dkk. (2018) juga menghasilkan kenaikan kekuatan tarik dan kekuatan tekuk (*bending strength*) dari resin *unsaturated polyester* murni hingga sekitar 90% saat ditambahkan nanopartikel ZnO ke dalamnya.

KESIMPULAN

Penelitian yang telah dilakukan menghasilkan kesimpulan bahwa penambahan *filler* TiO₂ cenderung meningkatkan nilai T_{d5%} dan Tonset yang menunjukkan terjadinya peningkatan stabilitas termal PLA. Penambahan *filler* ZnO cenderung menurunkan nilai T_{d5%}, T_{d10%}, dan Tonset yang menunjukkan terjadinya penurunan stabilitas termal PLA. Dalam hal sifat mekanis penambahan *filler* ZnO meningkatkan kekuatan dan keuletan namun menurunkan kekakuan PLA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Politeknik STMI Jakarta yang telah memberikan dana penelitian melalui Unit Penelitian dan Pengaduan kepada Masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Athanasoulia, I.-G., Mikropoulou, M., Karapati, S., Tarantili, P., dan Trapalis, C. (2018): *Study of thermomechanical and antibacterial properties of Panhellenic Scientific* (pp. 27553–27562). Athens: Materials Today: Proceedings.
- Chen, Hengzhi, Xiaoxue Tian, dan Jing Liu. (2018): *Unsaturated Polyester Resin Nanocomposites Containing ZnO Modified with Oleic Acid Activated by N,N'-Carbonyldiimidazole*. *Polymers* (Basel) 10(4), 362.
- Greco, Antonio, Francesca Ferrari, dan Alfonso Maffezzoli (2019): *Mechanical properties of poly(lactid acid) plasticized by cardanol derivatives*. *Polymer Degradation and Stability*, 159, 199-204.

- Harunsyah, M. Yunus, dan Reza F. (2017): Mechanical properties of bioplastics cassava starch film with zinc oxide nanofiller as reinforcement, *Materials Science and Engineering*, 210, 1–8.
- Jamshidian, M., Tehrani, E.A., Imran, M., Jacquot, M., dan Desobry, S. (2010): Poly-lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, 552–571.
- Kanmani, P. dan Rhim, J.W. (2014): Physical mechanical and antimicrobial properties of gelatin-based active nanocomposite films containing AgNPs and nanoclay, *Food Hydrocoll*, 35, 644–652.
- Klapiszewskia, Łukasz, Karol Bulab, Anna Dobrowolskac, Katarzyna Czaczykc, dan Teofil Jesionowskia (2019): A high-density polyethylene container based on ZnO/lignin dual fillers with potential antimicrobial activity. *Polymer Testing*, 73, 51–59.
- Lizundia, Erlantz, Marie Cristina Penayo, Alain Guinault, Jose Luis Vilas, dan Sandra Domenek. (2019): Impact of ZnO nanoparticle morphology on relaxation and transport properties of PLA nanocomposites. *Polymer Testing*, 75, 175-184.
- Marra, A., Silvestre, C., Duraccio, D., dan Cimmino, S. (2016): Polylactic acid/zinc oxide biocomposite films for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 254–262.
- Nakayama, Norio dan Toyoharu Hayashi (2007): Preparation and characterization of poly(L-lactic acid)/TiO₂ nanoparticle nanocomposite films with high transparency and efficient photodegradability. *Polymer Degradation and Stability*, 92, 1255–1264.
- Rahmanian, Reza, Sayed Ahmad Mozaffari, dan Mohammad Abedi (2015): Disposable urea biosensor based on nanoporous ZnO film fabricated from omissible polymeric substrate. *Materials Science & Engineering C*, 57, 387-396.
- Salahuddin, N., Abdelwahab, M., Gaber, M., dan Elneanaey, S. (2019): Synthesis and Design of Norfloxacin drug delivery system based on PLA/TiO₂. *Materials Science & Engineering*, 1-40.
- Santana-Aranda, M.A., M. Morán-Pineda, J. Hernández, dan S. Castillo (2005): Physical properties of TiO₂ prepared by sol-gel under different pH conditions for photocatalysis. *Superficies y Vacío*, 18, 46-49.
- Syamsul H., Akbar H.D.A., Rahmat F.S., Yus R. D. M., dan Isriyanti A. (2019): Perbandingan sifat mekanik bioplastik terhadap penambahan zinc oxide (ZnO), *Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Fisika*, 5, 8–12.
- Takkalkar, P., Tobin, M. J., Vongsvivut, J., Mukherjee, T., Nizamuddin, S., Griffin, G., dan Kao, N. (2019): Structural, thermal, rheological, and optical properties of poly(lactic acid) films prepared through solvent casting and melt processing. *Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 104, 293–300.
- Vasile, C., Râpa, M., Stefan, M., Macavei, S., Darie-Nița, R. N., Barbu, Tudoran, L., Vodnar, D.C., Popa, E. E., Ștefan, R., Borodi, G., dan Brebu, M. (2017): New PLA/ZnO:Cu/Ag bionanocomposites for food packaging, *EXPRESS Polymer Letters* 11, 531–544.
- Wypych, G. (2016): *Handbook of polymers 2nd edition*. ChemTec Publishing, Toronto, 399–400.
- Yang, Rui. 2018. *Analytical Methods for Polymer Characterization*. CRC Press.

NOMENKLATUR

EB	<i>elongation at break</i>
KT	kekuatan tarik
MY	modulus Young
T _{d5%}	temperatur saat hilang massa 5%
T _{d10%}	temperatur saat hilang massa 10%
Tonset	temperatur awal dekomposisi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)