

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.21

УДК 678.6; 661.179

Білоусова А.О., здобувач третього (доктор філософії) рівня, ORCID: 0000-0002-2818-8450, e-mail: a.bilousova@kpi.ua

Миронюк О.В., д.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0499-9491, e-mail: o.myronyuk@kpi.ua
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ

Bilousova Anna, postgraduate student

Myronyuk Oleksii, Doctor of technical sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Composite Materials
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ОДЕРЖАННЯ ПЛІВОК З ДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК ПОЛІЛАКТИДУ

Досліджено формування плівок з дисперсних частинок полілактиду (ПЛА), отриманих методом випаровування розчинника. Частинки діаметром 0,5—20 мкм із середнім еквівалентним розміром 3,8 мкм формують суцільне покриття при температурі 130 °С, проходячи стадії плавлення, агрегації та злиття. Досліджено вплив пластифікаторів на зниження температури плівкоутворення. Найефективнішим нелетким пластифікатором виявився поліетиленгліколь ($M_w = 400$), що забезпечує зниження температури до 85 °С. Моно н-бутиловий етер пропіленгліколю виявив ще вищу ефективність, однак обмежений у використанні через леткість. Інші досліджені пластифікатори мали слабший ефект. Отримані результати створюють основу для екологічно безпечних покриттів із ПЛА як альтернативи нафтовим полімерам.

Ключові слова: частинки; полілактид; полімер; синтез; покриття; розчин; випаровування.

The formation of films from dispersed polylactide (PLA) particles obtained by solvent evaporation was investigated. The particles with a diameter of 0.5-20 μm and an average equivalent size of 3.8 μm form a continuous coating at a temperature of 130 °C, passing through the stages of melting, aggregation, and fusion. The effect of plasticizers on reducing the film formation temperature was investigated. The most effective non-volatile plasticizer was polyethylene glycol ($M_w = 400$), which provides a temperature reduction of up to 85 °C. The mono-n-butyl ether of propylene glycol showed even higher efficiency, but is limited in use due to its volatility. Other plasticizers tested had a weaker effect. The results provide the basis for environmentally friendly coatings made of PLA as an alternative to petroleum polymers.

Keywords: particles; polylactide; polymer; synthesis; coating; solution; evaporation.

Постановка проблеми

Використання біоосновних та біорозкладних полімерів є одним зі шляхів реалізації цілей циркулярної економіки: зменшення екологічного навантаження при застосуванні синтетичних полімерних матеріалів, та відповідне зменшення карбонового сліду. На даний момент найбільш широкоживані полімери — полігідроксоалканоати та полілактид переробляються, в основному шляхом термопластичного формування, у той час, як технологія одержання покриттів з частинок (дисперсій або за аналогією з порошковими фарбами — сухого шару) лише починає розвиватися. Це пов'язано зі складнощами одержання дисперсій: оскільки отримання цих полімерів емульсійним шляхом ускладнене.

Отже, актуальною проблемою є розробка шляху одержання плівок з дисперсних частинок полілактиду та встановлення факторів, які дають змогу тонко регулювати цей процес. Розв'язання проблеми забезпечить передумови розвитку додаткової галузі використання біополімерів для заміни нафтових аналогів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Біоосновними полімери називають тоді, коли вони виготовлені з відновлюваної сировини — наприклад, з рослинної олії, кукурудзяного крохмалю чи целюлози. Водночас біорозкладними є полімери, які здатні розкладатися під дією мікроорганізмів у природному середовищі. Ці властивості можуть поєднуватися, але не завжди: деякі біоосновні полімери не розкладаються, а деякі біорозкладні — синтетичного походження. З відомих матеріалів цього класу, які поєднують ці дві властивості виокремлюється полілактид, виробництво якого налагоджено в промислових масштабах і складає приблизно 140 000 т/рік.

Основними галузями його застосування є харчова та медична промисловість [1—3], а також філамент для 3D-друку [4—6]. У той же час матеріал є доволі стійким в звичайних умовах використання і розкладається лише при підвищених до 40–60 °C температурах при компостуванні [7—9], тобто може бути використаний довготривало в неагресивних середовищах. Це обумовлює перспективи його використання в численних продуктах у формі тонкошарових покриттів — від декоративних покриттів на деревині та друкованих деталях з самого полілактиду до функціональних покриттів металу та інших видів пластику. Ця технологія може бути реалізована класичним шляхом одержання покриттів з розчинів полімерів, однак слід зважати на той факт, що полілактид має вузький перелік сумісних розчинників, більшість з яких (напр. дихлорметан) є токсичними.

Додатково, ця технологія потрапляє під заборону директиви ЄС про леткі органічні сполуки 1999/13/ЕС, що суттєво знижує її перспективність. Виходом є технологія водних дисперсій, яка була своєчасною відповіддю на впровадження екологічного законодавства. Ця технологія полягає у використанні стабілізованих емульсій полімерів у воді, які після нанесення на субстрат спочатку висихають, а потім за рахунок капілярних сил зливаються з частинок у суцільну плівку. Для полегшення останнього процесу використовують в невеликих кількостях розчинники-пластифікатори з низькою леткістю, які спочатку підвищують рухливість макромолекулярних ланцюгів і після злиття крапель випаровуються з плівки.

Другим варіантом вирішення проблеми з розчинниками є використання порошкової технології, яка передбачає нанесення дисперсних часток на поверхню з наступною термічною активацією. У цьому випадку молекулярна рухливість сегментів ланцюгів забезпечується за рахунок підвищення температури. Але також можуть використовуватися добавки, які знижують її необхідне значення для плівкоутворення. Підігрів може бути реалізований як за рахунок нагрівання субстрату (класичний спосіб для традиційних порошкових фарб), так і зовнішнім підводом теплоти (наприклад, ІЧ-опроміненням).

Особливої уваги заслуговує процес одержання дисперсій з полілактиду. Ця задача може бути вирішена такими методами як осадження з розчину (несумісним розчинником висолювання) або випаровування розчинника, яке включає диспергування та стабілізацію поверхнево-активними речовинами частинок розчину полілактиду в розчиннику, несумісному з водою з утворенням емульсії типу «олія у воді» та наступне випаровування з них розчинника шляхом дифузії в умовах підвищеної температури та використання вакууму. Такий процес описаний в [10], де в якості розчинника застосовано етилацетат на заміну токсичному дихлорметану.

В обох зазначених вище методах використання частинок полілактиду для одержання покриттів (з емульсій або порошків) важливим параметром є мінімальна температура плівкоутворення. Відомо, що вона не може бути нижчою ніж температура склування, яка у полілактиду знаходиться вище 60 °C [11] і варіюється в залежності від його кристалічної будови [12]. Це унеможливує використання емульсійної технології та підвищує температуру плівкоутворення для порошкової. Відомо, що ця температура може бути знижена за рахунок використання пластифікаторів.

Таким чином, дослідження процесу формування суцільних плівок, зокрема характерних стадій трансформації частинок порошку та впливу на температуру плівкоутворення добавок пластифікаторів є необхідною стадією для розвитку технології покриттів на основі даного полімеру.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є встановлення закономірностей поетапного формування плівок з шару частинок полілактиду та впливу добавок-пластифікаторів на характерні температури процесів.

Виклад основного матеріалу

У цьому дослідженні застосовували полілактид марки Ingeo Biopolymer 4060D (NatureWorks, США), що має температуру переходу в склоподібний стан у межах 55–60 °С, середню молекулярну масу (M_w) 190 кДа та містить 12 % D-ізомеру молочної кислоти. Цей матеріал було обрано завдяки його невисокій температурі склування, зумовленій аморфною будовою, що робить його особливо придатним для виготовлення плівок.

На початку експерименту натрій додецилсульфат розчиняли у дистильованій воді при кімнатній температурі, використовуючи повільне перемішування для уникнення надмірного піноутворення. Після повного розчинення до водного розчину поступово додавали полілактид, попередньо розчинений у дихлорметані, який було обрано через його здатність швидко випаровуватись. Суміш перемішували кілька годин із поступовим нагріванням до 60 °С. Далі систему витримували при цій температурі, а потім обробляли під вакуумом, щоб вилучити залишки розчинника. Отриману дисперсію центрифугували, а осад сушили при кімнатній температурі. У результаті утворилися мікрочастинки PLA, придатні для подальшого застосування у плівках. Для дослідження морфології частинок, а також їх гранулометричного розподілу було використано растровий електронний мікроскоп MIRA3 LMU (Tescan) при напрузі прискорення 10 кВ і струмі 12 пА.

Встановлено, що синтезовані частинки мають сферичну форму і середній розмір в межах від 0,5 до 18 мкм (рис. 1). Середньочисельний розмір частинок становить 3,8 мкм. Слід зазначити, що поверхня деяких з них на зображенні містить тріщини, але вони є артефактом методу дослідження який формується при тривалому знаходженні частинки у фокусі електронного променя (особливо при великих збільшеннях).

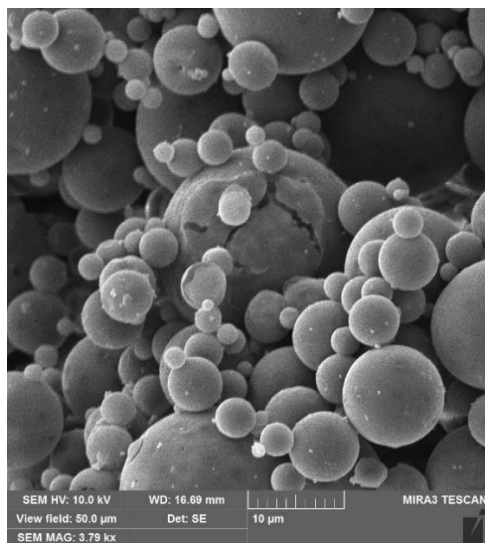


Рис. 1. Синтезовані частинки полілактиду

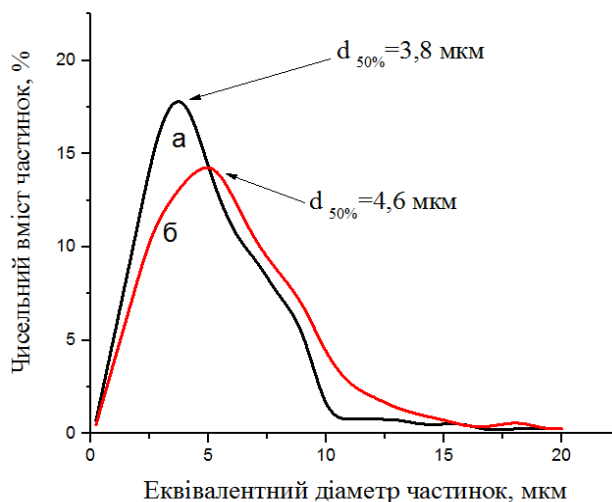


Рис. 2. Диференційні гранулометричні криві: а — отриманих частинок полілактиду; б — частинок дисперсії

У тріщинах маленьких та великих частинок можна помітити, що вони є порожнистими. Опосередковано цей факт підтверджується також тим, що діаметр одержаних частинок полілактиду близький до діаметру частинок емульсії (4,6 мкм) зі схожим гранулометричним розподілом (рис. 2).

Очевидно, що при висушуванні розчинника відбувається зменшення об'єму частинок, яке повинне було б призводити до суттєвого зменшення діаметру, але цього не відбувається, натомість в частинках утворюється порожнина. Подібні процеси були описані в роботах [13] та [14] і використовуються для синтезу порожнистих частинок. Частинки були редисперговані у дистильованій воді і нанесені з суспензії на поверхню скла, що після видалення носія (води)

дозволило одержати рівномірні покриття товщиною 150—200 мкм. Нанесений шар був витриманий при кімнатній температурі та додатково при 40 °С протягом 5 годин для видалення залишків води. Плівкоутворення з частинок відбувається при нагріві до температури 130 °С за рахунок розм'якшення їх стінок та злиття. Процес супроводжується утворенням прозорої плівки з непрозорого матового шару частинок за рахунок зникнення міжфазних границь (рис. 3 а). Лінія формування суцільного шару полімеру (перехід між областями 1 та 2) відповідає температурі 130 ± 5 °С. Процеси злиття частинок у суцільний шар пришвидшуються при підвищенні температури, що, очевидно, пов'язано зі зниженням в'язкості розплаву полімеру.

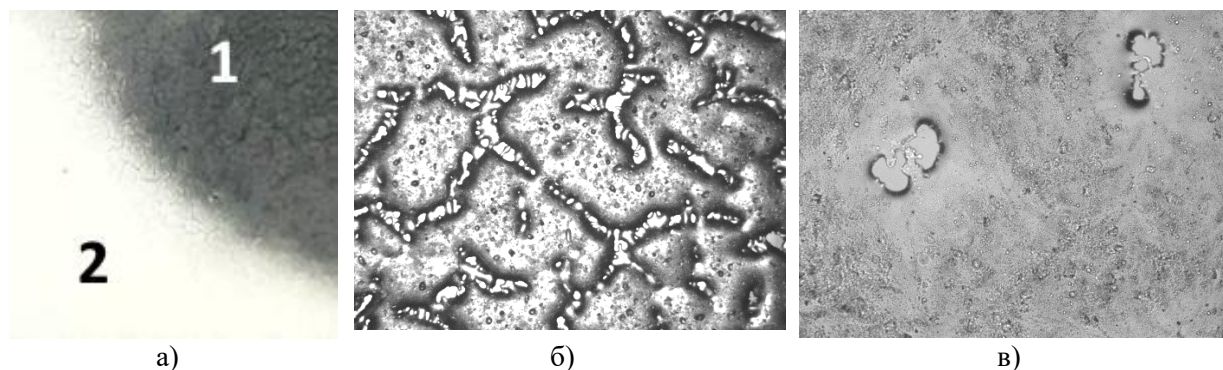


Рис. 3. Плівкоутворення з частинок полілактиду: а — термічна лінія плівкоутворення; б — формування кластерів; в — утворення суцільної плівки

Умовно процес плівкоутворення можна розділити на стадію дисперсних частинок (початкова, область 2 на рис. 3, а), їх плавлення та часткову коалесценцію (рис. 3, б.) та утворення суцільного шару з дефектами у вигляді отворів (рис. 3, в), які поступово затягуються під дією капілярного натягу.

Порівняно висока температура плівкоутворення є небажаним фактором як з точки зору енергопотреб технології так і неможливості одержувати покриття без додаткової операції нагріву. Одним з методів зниження цієї температури є використання пластифікаторів, які підвищують рухливість макромолекулярних ланцюгів за рахунок зниження вандерваальсівської взаємодії між ними. Пластифікатори були поєднані з частинками полілактиду методом сухого змішування (дозований пластифікатор наносився на частинки порошку тривалим періодичним змішуванням, як в роботі [15]). Встановлено (табл. 1), що найбільш ефективним нелетким пластифікатором при вмісті 20 мас. % є поліпропіленгліколь з молекулярною масою 400 г/моль.

Таблиця 1. Вплив пластифікаторів при вмісті 20 мас. % на температуру плівкоутворення частинок полілактиду

Пластифікатор	Температура плівкоутворення частинок, °С
Непластифікований полімер	130 ± 3
Поліетиленгліколь ($M_w = 400$)	85 ± 3
Етиленгліколь	110 ± 3
Дибутилфталат	112 ± 3
Моно н-бутиловий естер пропіленгліколю	62 ± 3
Поліакрилат натрію	121 ± 3

Моно н-бутиловий естер пропіленгліколю демонструє ще більше пригнічення температури плівкоутворення, однак є леткою органічною сполукою, тож не може бути використаний в композиціях зі зниженим екологічним впливом. Інші пластифікатори — етиленгліколь, дибутилфталат є менш ефективними, а поліакрилат натрію внаслідок своєї високої гідрофільності зумовленої іонною природою сполуки та, як наслідок несумісності з полілактидом — практично не ефективний.

Висновки

Показано, що частинки полілактиду діаметром 0,5—20 мкм та середнім еквівалентним розміром 3,8 мкм можуть бути одержані методом випаровування розчинника. При цьому утворюються порожнисті частинки.

Встановлено, що температура плівкоутворення з гару таких частинок становить 130 °С. При цьому процес плівкоутворення умовно можна поділити на стадії плавлення індивідуальних частинок, їх злиття в кластери та поступове формування суцільної плівки. Оскільки основними параметрами, які визначають хід цього процесу є в'язкість розплаву та капілярний тиск, він пришвидшується при підвищених температурах.

Показано, що температура плівкоутворення може бути суттєво (до 85 °С) знижена використанням нелеткого пластифікатора — поліетиленгліколю з молекулярною масою 400. Більш ефективним є леткий пластифікатор — моно н-бутиловий естер пропіленгліколю, але оскільки він є легкою органічною рідиною — він не може бути використаний в екологічно сумісних застосуваннях. Втім, використання таких тимчасових пластифікаторів може бути виправдане при умові їх уловлення та рециркуляції.

Це дослідження було профінансовано Міністерством освіти і науки України, угода № РН/53-2024 від 26.09.2024 (інструмент допомоги Європейського Союзу на виконання зобов'язань України в рамках Рамкової програми Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020»).

Список використаної літератури

1. Swetha, T. A., Bora, A., Mohanrasu, K., Balaji, P., Raja, R., Ponnuchamy, K., Muthusamy, G., & Arun, A. (2023). A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123715. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123715>
2. Yang, Z., Yin, G., Sun, S., & Xu, P. (2024). Medical applications and prospects of polylactic acid materials. *iScience*, 27(12), 111512. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111512>
3. DeStefano, V., Khan, S., & Tabada, A. (2020). Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration*, 1, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.08.002>
4. Joseph, T. M., Kallingal, A., Suresh, A. M., Mahapatra, D. K., Hasanin, M. S., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2023). 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(3–4), 1015–1035. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10795-y>
5. Liu, W., Zhou, J., Ma, Y., Wang, J., & Xu, J. (2017). Fabrication of PLA Filaments and its Printable Performance. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 275, 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/275/1/012033>
6. Arockiam, A. J., Subramanian, N. K., Padmanabhan, R., Selvaraj, N. R., Bagal, N. D. K., & Rajesh, S. (2021). A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. *Materials Today Proceedings*, 50, 2057–2064. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.413>
7. Kale, G., Auras, R., Singh, S. P., & Narayan, R. (2007). Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. *Polymer Testing*, 26(8), 1049–1061. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.07.006>
8. Maragkaki, A., Malliaros, N. G., Sampathianakis, I., Lolos, T., Tsompanidis, C., & Manios, T. (2023). Evaluation of Biodegradability of Polylactic Acid and Compostable Bags from Food Waste under Industrial Composting. *Sustainability*, 15(22), 15963. <https://doi.org/10.3390/su152215963>
9. Ainali, N. M., Tarani, E., Zamboulis, A., Črešnar, K. P., Zemljič, L. F., Chrissafis, K., Lambropoulou, D. A., & Bikiaris, D. N. (2021). Thermal Stability and Decomposition Mechanism of PLA Nanocomposites with Kraft Lignin and Tannin. *Polymers*, 13(16), 2818. <https://doi.org/10.3390/polym13162818>

10. Belletti, G., Buoso, S., Ricci, L., Guillem-Ortiz, A., Aragón-Gutiérrez, A., Bortolini, O., & Bertoldo, M. (2021). Preparations of Poly(lactic acid) Dispersions in Water for Coating Applications. *Polymers*, 13(16), 2767. <https://doi.org/10.3390/polym13162767>
11. Baker, G., Vogel, E., & Smith, M. (2008). Glass transitions in polylactides. *Polymer Reviews*, 48(1), 64–84. <https://doi.org/10.1080/15583720701834208>
12. Zhang, R., Du, F., Jariyavidyanont, K., Zhuravlev, E., Schick, C., & Androsch, R. (2022). Glass transition temperature of poly(d,l-lactic acid) of different molar mass. *Thermochimica Acta*, 718, 179387. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179387>
13. Ramli, R. A. (2017). Hollow polymer particles: a review. *RSC Advances*, 7(83), 52632–52650. <https://doi.org/10.1039/c7ra10358a>
14. Zou, H., & Shang, K. (2021). Synthetic strategies for hollow particles with open holes on their surfaces. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(10), 3765–3787. <https://doi.org/10.1039/d1qm00217a>
15. Domian, E., & Cenker, J. (2013). Flowability and Homogeneity of Food Powders with Plated Oil Ingredient. *Journal of Food Process Engineering*, 36(5), 626–633. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12026>

FORMATION OF FILMS BASED ON DISPERSED POLYLACTIDE PARTICLES

Abstract

The study addresses a current challenge in the development of environmentally friendly polymer coatings by investigating the formation of continuous films from dispersed polylactide (PLA) particles. As the global focus on circular economy grows, substituting petroleum-derived polymers with bio-based and biodegradable alternatives such as PLA becomes increasingly relevant. The objective was to analyze how PLA particles, produced via solvent evaporation, undergo thermal transformations and how these processes can be modified using plasticizers.

The formation of polylactide dispersions is a key focus, achievable via solvent evaporation or precipitation (using a non-solvent or salting-out). Solvent evaporation involves dispersing PLA in a water-immiscible solvent, stabilizing the emulsion with surfactants, and removing the solvent under heat and vacuum. In both emulsion and powder-based coatings, the minimum film formation temperature (MFT) is critical. For PLA, MFT cannot be below its glass transition temperature (above 60 °C), which depends on crystallinity. This limits emulsion use and raises MFT for powders. Plasticizers can reduce MFT, making it essential to study film formation stages and plasticizer effects to develop PLA-based coating technologies.

PLA particles with diameters ranging from 0.5 to 20 µm (3.8 µm on average) were prepared using dichloromethane, which was chosen for its ability to evaporate easily. The film formation temperature from these particles is around 130 °C and includes melting, clustering, and continuous film formation stages. This process depends mainly on melt viscosity and capillary pressure, and is accelerated at higher temperatures. However, this high film formation temperature limits the practicality of the method. To solve this problem, various plasticizers were tested for their ability to reduce the minimum film formation temperature (MFT). Polyethylene glycol proved to be the most effective non-volatile plasticizer, reducing the MFT to 85 °C. Other plasticizers tested, had a weaker effect. A more effective plasticizer is the volatile mono-n-butyl ether of propylene glycol; however, its volatility limits its use in eco-friendly applications. Still, its use may be justified if recovery and recycling systems are employed.

References

- [1] Swetha, T. A., Bora, A., Mohanrasu, K., Balaji, P., Raja, R., Ponnuchamy, K., Muthusamy, G., & Arun, A. (2023). A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123715. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123715>
- [2] Yang, Z., Yin, G., Sun, S., & Xu, P. (2024). Medical applications and prospects of polylactic acid materials. *iScience*, 27(12), 111512. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111512>

- [3] DeStefano, V., Khan, S., & Tabada, A. (2020). Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration*, 1, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.08.002>
- [4] Joseph, T. M., Kallingal, A., Suresh, A. M., Mahapatra, D. K., Hasanin, M. S., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2023). 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(3–4), 1015–1035. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10795-y>
- [5] Liu, W., Zhou, J., Ma, Y., Wang, J., & Xu, J. (2017). Fabrication of PLA Filaments and its Printable Performance. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 275, 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/275/1/012033>
- [6] Arockiam, A. J., Subramanian, N. K., Padmanabhan, R., Selvaraj, N. R., Bagal, N. D. K., & Rajesh, S. (2021). A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. *Materials Today Proceedings*, 50, 2057–2064. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.413>
- [7] Kale, G., Auras, R., Singh, S. P., & Narayan, R. (2007). Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. *Polymer Testing*, 26(8), 1049–1061. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.07.006>
- [8] Maragkaki, A., Malliaros, N. G., Sampathianakis, I., Lolos, T., Tsompanidis, C., & Manios, T. (2023). Evaluation of Biodegradability of Polylactic Acid and Compostable Bags from Food Waste under Industrial Composting. *Sustainability*, 15(22), 15963. <https://doi.org/10.3390/su152215963>
- [9] Ainali, N. M., Tarani, E., Zamboulis, A., Črešnar, K. P., Zemljič, L. F., Chrissafis, K., Lambropoulou, D. A., & Bikiaris, D. N. (2021). Thermal Stability and Decomposition Mechanism of PLA Nanocomposites with Kraft Lignin and Tannin. *Polymers*, 13(16), 2818. <https://doi.org/10.3390/polym13162818>
- [10] Belletti, G., Buoso, S., Ricci, L., Guillem-Ortiz, A., Aragón-Gutiérrez, A., Bortolini, O., & Bertoldo, M. (2021). Preparations of Poly(lactic acid) Dispersions in Water for Coating Applications. *Polymers*, 13(16), 2767. <https://doi.org/10.3390/polym13162767>
- [11] Baker, G., Vogel, E., & Smith, M. (2008). Glass transitions in polylactides. *Polymer Reviews*, 48(1), 64–84. <https://doi.org/10.1080/15583720701834208>
- [12] Zhang, R., Du, F., Jariyavidyanont, K., Zhuravlev, E., Schick, C., & Androsch, R. (2022). Glass transition temperature of poly(d,l-lactic acid) of different molar mass. *Thermochimica Acta*, 718, 179387. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179387>
- [13] Ramli, R. A. (2017). Hollow polymer particles: a review. *RSC Advances*, 7(83), 52632–52650. <https://doi.org/10.1039/c7ra10358a>
- [14] Zou, H., & Shang, K. (2021). Synthetic strategies for hollow particles with open holes on their surfaces. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(10), 3765–3787. <https://doi.org/10.1039/d1qm00217a>
- [15] Domian, E., & Cenker, J. (2013). Flowability and Homogeneity of Food Powders with Plated Oil Ingredient. *Journal of Food Process Engineering*, 36(5), 626–633. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12026>

Надійшла до редколегії 09.05.2025