

Сова Н.В., Савченко Б.М., Ляшок І.О.,
Крюкова О.А., Рейвах О.В.

ПЕРЕРОБКА ВІДХОДІВ БІОПОЛІМЕРІВ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА МІСЬКЕ СЕРЕДОВИЩЕ

Оскільки біополімери входять до складу твердих побутових відходів, технології їх переробки критично важливі для мінімізації негативного впливу на міське середовище. Високої популярності біопластики набули завдяки здатності до біологічного розкладання, а отже, зменшення екологічної шкоди від накопичення відходів.

Стаття присвячена визначенню можливості багаторазової переробки полібутилен-адипат-ко-терефталату (ПБАТ) для зменшення впливу біопластику на навколишнє середовище за рахунок удосконалення технології переробки його відходів з мінімальними втратами і забрудненням довкілля. Досліджено зміну реологічних характеристик зразків трьох типів ПБАТ, зокрема повторно переробленого, під впливом температури, вологості та кратності переробки. Встановлено, що підвищення температури значно підсилює текучість ПБАТ; зокрема, показник текучості розплаву (ПТР) для вторинного ПБАТ зростає у 3,7 рази при збільшенні температури на кожні 30 °С, демонструючи його підвищену чутливість до термічного впливу. При цьому висока текучість вторинного матеріалу може бути потенційно використана для поліпшення механічних властивостей біополімеру. Встановлено, що багаторазова переробка спричиняє прогресуючу деградацію, про що свідчить систематичне підвищення ПТР на 4-5 одиниць з кожним циклом. Для гарантування якості продукції рекомендовано обмежити кількість циклів переробки для первинних марок до 10 циклів та до 5 циклів для вторинного ПБАТ. Доведено критичне значення попереднього висушування, оскільки волога інтенсифікує гідролітичну деструкцію та знижує термостабільність. Проведене дослідження підтверджує перспективність та технологічну доцільність використання відходів ПБАТ для створення ефективної та сталої системи утилізації, спрямованої на мінімізацію негативного впливу полімерних відходів на міське довкілля. Використання вторинних ресурсів є перспективним напрямом для створення екологічно сталих виробничих систем.

Ключові слова: Переробка відходів, полібутилен-адипат-терефталат (ПБАТ), рециклінг, ПТР, термостабільність, міське довкілля.

Постановка проблеми. Приблизно 3% усіх світових викидів парникових газів пов'язані з виготовленням та подальшою обробкою полімерних матеріалів. Щорічно виробляються сотні мільйонів тон пластику, але у нову продукцію фактично трансформується лише десята частина. Згідно з доповіддю Програми Організації Об'єднаних Націй з навколишнього середовища (ЮНЕП), забруднення пластиком може бути скорочене на 80% до 2040 року. Для досягнення цієї цілі необхідні кардинальні політичні та ринкові трансформації, які мають бути впроваджені країнами та корпораціями, використовуючи вже наявні технологічні рішення [1].

Оскільки біополімери входять до складу твердих комунальних відходів (ТКВ), технології їх переробки критично важливі для мінімізації негативного впливу на міське середовище. Полібутилен-адипат-ко-терефталат (ПБАТ) належить до провідної категорії біополімерів. Згідно з дослідженнями [2], він сьогодні активно використовується і вважається одним із найбільш затребуваних біопластичних матеріалів на ринку.

Таким чином, розробка ефективної та сталої технології переробки відходів біополімерів, зокрема ПБАТ, становить стратегічний інтерес для підвищення ефективності управління

відходами, реалізації принципів циклічної економіки та сприятиме досягненню глобальних цілей скорочення пластикового забруднення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Високої популярності біопластики набули завдяки здатності до *біологічного розкладання*, а отже, зменшення екологічної шкоди від накопичення *відходів* [3]. Зважаючи на низький рівень застосування технологій компостування при переробці твердих побутових відходів в Україні, життєво важливим є поглиблення досліджень процесів біорозкладу, зокрема з акцентом на безпечність впливу продуктів деструкції на живі організми. Розробка нових методів компостування та забезпечення сучасних потреб у об'єктах промислового компостування, а також розширення первинної сировинної бази за рахунок сільськогосподарських та харчових відходів для зниження вартості [4] є першочерговим завданням для інженерів і науковців. Не менш важливим є вирішення питань незадовільної поінформованості споживачів щодо поводження з одноразовим біорозкладним пакуванням і удосконалення системи управління цими відходами, що охоплює збір, сортування та компостування [5].

Полібутилен-адипат-ко-терефталат (ПБАТ) – це біорозкладний, компостований термопластичний кополіестер на основі нафти (або потенційно біорозкладний), відомий своєю еластичністю, міцністю та здатністю імітувати властивості поліетилену низької щільності. Це робить ПБАТ популярною екологічно чистою альтернативою для плівок, упаковки та сільськогосподарської мульчі [6], хоча його виробнича вартість може бути вищою, ніж у традиційних пластмас.

ПБАТ промислово синтезується з різних мономерів, таких як 1,4-бутандіол, адипінова кислота та диметилтерефталат або терефталева кислота. Ці мономерні зазвичай виготовляються з таких невідновлюваних ресурсів, як сира нафта [7]. Таким чином, сучасне виробництво мономерів базується на «коричневій хімії» на відміну від «зеленої хімії». Виробництво ПБАТ з використанням мономерів, отриманих з відновлюваних ресурсів, таких як біомаса, може сприяти вирішенню таких проблем, як виснаження ресурсів, викиди парникових газів та екологічні загрози [8].

Автори дослідження [6] оцінюють небіологічне виробництво мономерів РВАТ з біомаси, як сировини, за допомогою гетерогенних каталітичних реакцій. Запропоновані каталітичні шляхи ще не є повністю конкурентоспроможними з традиційними шляхами на основі викопного палива, головним чином через високі ціни на сировину та існування інших альтернатив. Однак, враховуючи постійний технологічний прогрес у виробництві мономерів РВАТ з відновлюваних джерел, біологічний РВАТ має бути економічно вигідним найближчим часом.

РВАТ часто змішується з іншими біорозкладними полімерами (наприклад, полімолочною кислотою (PLA)) для покращення фізико-механічних та термічних властивостей кінцевого продукту (зокрема, біорозкладних плівок) [9]. Наприклад, мульчуючі плівки, виготовлені шляхом змішування РВАТ та PLA широко використовуються для покращення стану ґрунту та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур у сільському господарстві [10]. Хоча результати досліджень [11-12] показують, що мікропластик ПБАТ може розкладатися мікроорганізмами з утворенням хімічних речовин, які є високотоксичними для рослин, що підтверджує гіпотезу, що біорозкладні пластики можуть становити небезпеку для навколишнього середовища.

З огляду на те, що основним виробом з ПБАТ є пакувальна продукція і, беручи до уваги бажання суттєво зменшити обсяги відходів ПБАТ, що потрапляють на полігони міст, та збільшити кількість циклів його використання, розробка технології повторної переробки як первинного так і вторинного ПБАТ стає все більш актуальною.

Мета дослідження. Мета дослідження – визначення можливості багаторазової переробки ПБАТ для зменшення впливу біопластику на навколишнє середовище за рахунок

удосконалення технології переробки його відходів з мінімальними втратами і забрудненням довкілля.

Основний матеріал дослідження. В роботі для досліджень використали біополімери:

~ПБАТ 1 – BASF Ecoflex® C1200 Biodegradable Polyester,

~ПБАТ 2 – BASF Ecovio® C2332 F Blend Biodegradable Polyester,

~вторинний ПБАТ, отриманий шляхом агломерування відходів з виробництва біопакетів, що використовуються для пакування.

Ecoflex® C1200 (ПБАТ 1) — це біорозкладний аліфатично-ароматичний співполіефір на основі мономерів 1,4-бутандіолу, адипінової кислоти та терефталової кислоти в полімерному ланцюзі [13]. ПБАТ 1 біологічно розкладається до основних мономерів 1,4-бутандіолу, адипінової кислоти та терефталової кислоти та, зрештою, до вуглекислого газу, води та біомаси під час метаболізму в ґрунті чи компості за стандартних умов. ПБАТ 1 розроблено для виготовлення плівок методом роздуву або лиття. Типовими застосуваннями є пакувальні плівки, плівки для сільського господарства та мішки для компосту.

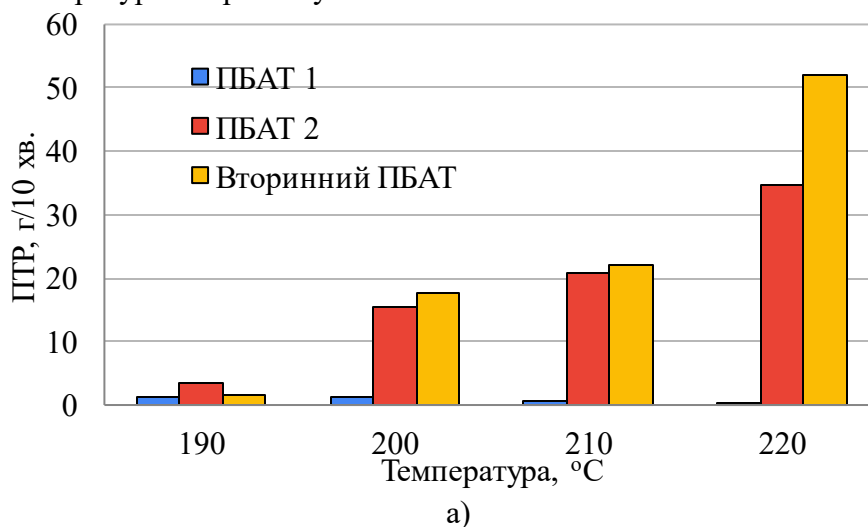
Ecovio® F Blend C2332 (ПБАТ 2) — біорозкладний полімер, який містить 18% відновлюваної сировини [14]. Це в основному суміш біорозкладного співполіефіру Ecoflex® F Blend і PLA. Завдяки своїй надзвичайній механічній міцності з ПБАТ 2 виготовляють пакети для сміття, для органічних відходів, сільськогосподарську плівку тощо. ПБАТ 2 вже містить антиблокувальні та ковзаючі добавки, які необхідні для легкої переробки на екструзійному обладнанні.

В даній роботі визначали вплив температури на показник текучості розплаву (ПТР) зразків, як показник термостабільності та оцінювали здатність до багаторазового перероблення. Визначення ПТР проводилося відповідно до ДСТУ EN ISO 1133-1:2022 «Пластмаси. Визначення швидкості масової течії розплаву (MFR) і об'ємної швидкості течії розплаву (MVR) термопластів. Частина 1» для висушених та кондиціонованих зразків ПБАТ.

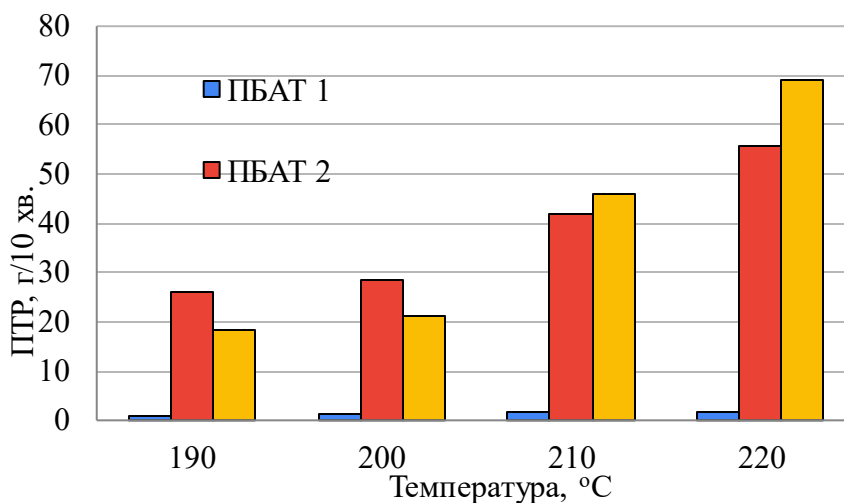
Визначення здатності до багатократного перероблення відбувалося через серію переробних циклів. Для визначення ПТР застосовували прилад «Полімер ПТ-1», вантаж 2,16 кг, сопло $d = 2,095$ мм, тривалість витримки 3 хв.

Під час дослідження зразків ПБАТ різних висушених та кондиційованих марок було встановлено залежність текучості матеріалів від температури процесу (рис.1).

Аналіз графічних даних показує, що ПТР різних висушених марок ПБАТ (рис.1 а) чутливий до температурного режиму.



Екологічна безпека



б)

Рисунок – 1. Залежність показника текучості розплаву висушеного (а) та кондиціонованого (б) ПБАТ від температури.

Для всіх зразків відзначено очікуване підвищення текучості із зростанням температури від 190 °C до 220 °C. Для ПБАТ 1 характерний вкрай низький ПТР у всьому дослідженому діапазоні. Це свідчить про його високу молекулярну масу та придатність для технологій екструзії або видувного формування. ПБАТ 2 має помірний ПТР, який значно зростає з підвищенням температури, від приблизно 3 г/10 хв при 190 °C до приблизно 35 г/10 хв при 220 °C. Це вказує на меншу молекулярну масу порівняно з ПБАТ 1 і придатність для лиття під тиском. Максимального значення ПТР демонструє висушений вторинний ПБАТ, що значно перевищує ПТР для ПБАТ 2, і становить приблизно 52 г/10 хв.

Для кондиційованих зразків (рис. 1 б) значно вищі абсолютні значення ПТР у всьому температурному діапазоні. ПТР для ПБАТ 1 постійно демонструє вкрай низьке значення 2 г/10 хв, на відміну від ПБАТ 2, який характеризується помірним ПТР в межах 25-56 г/10 хв. Вторинна сировина ПБАТ виявляє найбільшу текучість при високих температурах 210 °C та 220 °C, сягаючи 70 г/10 хв. Це різке зростання ПТР у переробленого матеріалу є типовою ознакою зменшення середньої молекулярної маси, що, ймовірно, сталося внаслідок термомеханічної деградації. Ці реологічні відмінності критично важливі для налаштування технологічних параметрів і безпосередньо впливають на якість та фізико-механічні характеристики кінцевої продукції.

Таким чином, з підвищенням температури з 190°C до 220°C спостерігається підвищення показника текучості розплаву для вторинного ПБАТ приблизно в 3,7 рази. Для зразка ПБАТ 2 текучість зростає в 1,2 рази при збільшенні температури вимірювання на 30°C, що ймовірно пов'язано з присутністю в складі матеріалу добавки полілактиду, який запобігає різкому зростанню текучості. Всі кондиційовані зразки мають вищі показники ПТР у порівнянні з висушеними, що свідчить про вплив вологи на деструктивні процеси в ПБАТ.

З метою встановлення характеру зміни властивостей матеріалу при багаторазовому впливі термомеханічних напружень в роботі досліджували багаторазову переробку ПБАТ. На рис. 2. наведено залежність показника текучості розплаву ПБАТ від кратності перероблення при 210°C.

Для всіх трьох типів ПБАТ спостерігається чітка тенденція до зростання ПТР пропорційно збільшенню кількості циклів переробки. Це свідчить про прогресуюче зниження молекулярної маси полімеру внаслідок посилення термомеханічної деструкції під час кожного

Екологічна безпека

циклу переробки. Оскільки високе значення ПТР, особливо понад 50–60 г/10 хв, може зробити матеріал непридатним для виготовлення виробів, кількість циклів повторної переробки рекомендується встановити в межах 10 циклів для ПБАТ 1 та ПБАТ 2. Для вторинного ПБАТ кількість повторних циклів переробки не повинна перевищувати 5.

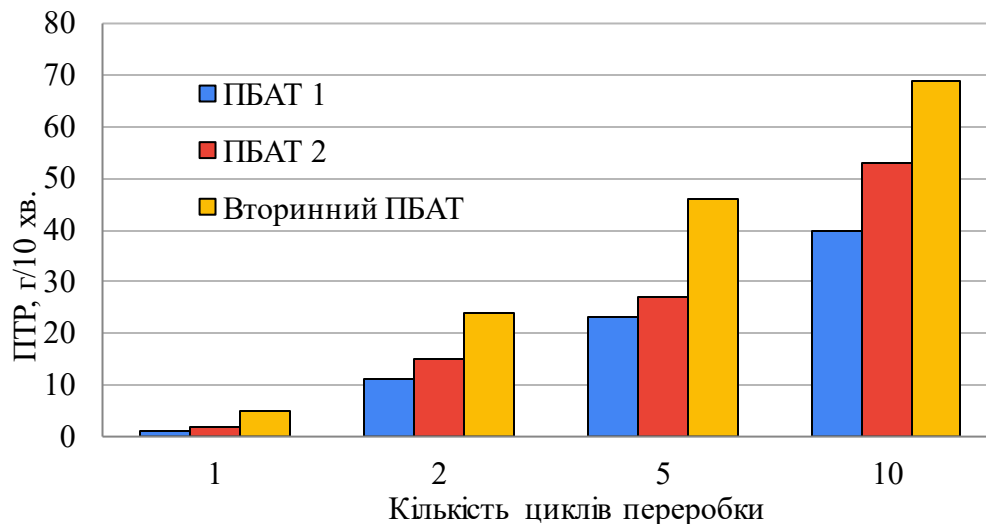


Рисунок 2 – Залежність показника текучості розплаву ПБАТ від кратності перероблення при 210°C.

Таким чином, практична реалізація технології повторної переробки ПБАТ є стратегічним кроком у відповідь на виклики щодо управління відходами, забезпечуючи перехід до більш відповідального використання цього важливого біопластику.

ВИСНОВКИ

В результаті досліджень встановлено, що підвищення температури значно підсилює текучість ПБАТ, причому для вторинного ПБАТ спостерігається різке збільшення ПТР у 3,7 рази при підвищенні температури на кожні 30 °C, що свідчить про його підвищену чутливість до термічного впливу. При цьому вищий рівень текучості вторинного матеріалу може позитивно впливати на механічні властивості фінального біополімеру, що відкриває потенціал для його ефективного використання.

Наявність вологи, навіть у кондиційованих зразках, істотно підвищує текучість при високих температурах, що свідчить про інтенсифікацію гідролітичної деструкції. З цієї причини висушений матеріал демонструє вищу термостабільність порівняно з матеріалом, що містить вологу.

Багаторазова переробка призводить до систематичного погіршення реологічних властивостей, оскільки кожен наступний цикл стабільно підвищує ПТР матеріалу приблизно на 4-5 одиниць, тому для гарантування максимальної якості вторинної сировини потрібно встановити чіткий ліміт на кількість циклів для кожної марки ПБАТ. Так для первинних ПБАТ 1 та ПБАТ 2 кількість повторних циклів переробки може складати до 10, тоді як для вторинного ПБАТ – не повинно перевищувати 5 циклів.

Проведене дослідження підтверджує перспективність та технологічну доцільність використання відходів ПБАТ для створення ефективної та сталої системи утилізації, спрямованої на мінімізацію негативного впливу полімерних відходів на міське довкілля.

Використання вторинних ресурсів є перспективним напрямом для створення екологічно сталих виробничих систем.

Список використаних джерел

1. UNEP. Solutions to Cut Global Plastic Pollution. UNEP, 2023. Режим доступу: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-roadmap-outlines-solutions-cut-global-plastic-pollution> (дата звернення: 06.12.2025).
2. Bartolucci L. Piechota Sustainable valorization of bioplastic waste: a review on effective recycling routes for the most widely used biopolymers / L. Bartolucci, S. Cordiner, E. De Maina, G. Kumar, P. Mele, V. Mulone, B. Igliński, G. // IJMS. – 2023. – Vol. 24, no. 9. – 7696. <https://doi.org/10.3390/ijms24097696>
3. Kumar S. Combating micro/nanoplastic pollution with bioplastic: Sustainable food packaging, challenges, and future / S. Kumar, N. Dubey, I. Choi, J. Jeon, M. Kim // Environmental Pollution. – 2024. – Vol. 363, no. 1. – 125077. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125077>
4. Самойленко Н.М. Актуальні аспекти розробки та використання біополімерних матеріалів для одноразового пакування / Н.М. Самойленко, Ю.С. Гадаєва // Екологічні науки. – 2025. – Vol. 59, no 2. – С.330-336. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.49>
5. Plastics of the Future? An Interdisciplinary Review on Biobased and Biodegradable Polymers: Progress in Chemistry, Societal Views, and Environmental Implications / Sara T. R. Velasquez, Qisong Hu, Johanna Kramm, Vitória C. Santin, Carolin Völker, Frederik R. Wurm // Angewandte Chemie International Edition. – 2025. – Vol. 64, no. 23. – e202423406. <https://doi.org/10.1002/anie.202423406>
6. Towards Sustainable Production of Polybutylene Adipate Terephthalate: Non-Biological Catalytic Syntheses of Biomass-Derived Constituents / Jechan Lee, Chanyeong Park, Yiu Fai Tsang, Kun-Yi Andrew Lin // ChemSusChem. – 2024. – Vol.17, no. 23. – e202401070. <https://doi.org/10.1002/cssc.202401070>
7. Biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) / Ty Burford, William Rieg, Samy Madbouly // Physical Sciences Reviews. – 2021. – Vol. 8, no. 8. – P. 1127-1156. <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0078>
8. A study on the synthesis, modification and current market status of PBAT / W. Xu // E3S Web Conf. –2023. – Vol. 385. – 04007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338504007>
9. Recent advances in biodegradable polymer blends and their biocomposites: a comprehensive review / Kehinde Olonisakin, Amar K. Mohanty, Mahendra Thimmanagari and Manjusri Misra // Green Chem. – 2025. – Vol. 27. – 11656-11704. <https://doi.org/10.1039/D5GC01294E>
10. Advancing sustainable agriculture: Evaluation of Poly (lactic acid) (PLA) based mulch films and identification of biodegrading microorganisms among soil microbiota / Manmath Parida, Tapaswini Jena, Smita Mohanty, Sanjay K. Nayak // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 269, no. 2. – 132085. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132085>
11. Negative effects of poly(butylene adipate-co-terephthalate) microplastics on Arabidopsis and its root-associated microbiome / Jiayi Liu, Peiyuan Wang, Yufan Wang, Yujia Zhang, Tengqi Xu, Yiqiong Zhang, Jiao Xi, Lijun Hou, Li Li, Zengqiang Zhang, Yanbing Lin // Journal of Hazardous Materials. – 2022. – Vol. 437. – 129294. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129294>.

12. Efficient and precise outdoor lifetime prediction method for biodegradable poly (butylene adipate/ terephthalate) under various climate conditions / Yan Ye, Guoshuo Tang, Xiangze Meng, Rui Yang, Baohua Guo, Xuming Xie // Journal of Cleaner Production. – 2025. – Vol. 500. – 145276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145276> .

13. BASF Ecoflex® C1200 F Blend Biodegradable Polyester. Режим доступу: https://lookpolymers.com/polymer_BASF-Ecoflex-C1200-F-Blend-Biodegradable-Polyester.php (дата звернення: 01.12.2025).

14. BASF Ecovio® C2332 F Blend Biodegradable Polyester. Режим доступу. https://www.lookpolymers.com/polymer_BASF-Ecovio-C2332-F-Blend-Biodegradable-Polyester.php (дата звернення: 1.12.2025).

**Sova N.V., Savchenko B.M., Liashok I.O.,
Kryukova O.A., Reivakh O.V.**

BIOPOLYMERS WASTE PROCESSING TO MINIMIZE OF THE NEGATIVE IMPACT ON THE URBAN ENVIRONMENT

Since biopolymers are part of solid waste, their processing technologies are critically important for minimizing the negative impact on the urban environment. Bioplastics have gained great popularity due to their ability to biodegrade, and therefore, reduce environmental damage from waste accumulation.

The article is devoted to determining the possibility of multiple recycling of polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) to reduce the impact of bioplastics on the environment by improving the technology for recycling its waste with minimal losses and environmental pollution. The change in the rheological characteristics of samples of three types of PBAT, in particular the recycled one, under the influence of temperature, humidity and number of recycling was studied. It was found that an increase in temperature significantly increases the fluidity of PBAT; in particular, the melt flow index (MFI) for secondary PBAT increases by 3.7 times with an increase in temperature for every 30 °C, demonstrating its increased sensitivity to thermal effects. At the same time, the high fluidity of the secondary material can potentially be used to improve the mechanical properties of the biopolymer. It has been established that multiple recycling causes progressive degradation, as evidenced by a systematic increase in the PTR by 4-5 units with each cycle. To guarantee product quality, it is recommended to limit the number of recycling cycles for primary grades to 10 cycles and to 5 cycles for secondary PBAT. The critical importance of preliminary drying has been proven, since moisture intensifies hydrolytic destruction and reduces thermal stability. The study confirms the prospects and technological feasibility of using PBAT waste to create an effective and sustainable recycling system aimed at minimizing the negative impact of polymer waste on the urban environment. The use of secondary resources is a promising direction for creating environmentally sustainable production systems.

Keywords: Waste processing, polybutylene adipate terephthalate (PBAT), recycling, MFI, thermal stability, urban environment.

Стаття надійшла 10.12.2025р.