

УДК 678.028.3:628.4

ВИКОРИСТАННЯ БІОПЛАСТИКУ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПАКУВАННЯ І ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕРОБКИ БІОПАКУВАННЯ

О. В. Криховець

*Національний університет «Львівська Політехніка»
79013, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна*

Дана робота присвячена аналізу переваг і недоліків застосування біопластикових матеріалів у виробництві екологічного пакування, а також дослідженню технологій їх переробки. Ринок біопластикових матеріалів демонструє стабільну тенденцію до зростання, зокрема і у сфері пакування. Заміна традиційних полімерів біопластиками не може розглядатися як універсальне вирішення проблем, пов'язаних із використанням пакувальних матеріалів. У найближчий час прогнозується використання в якості пакувальних матеріалів як звичайних пластиків так і біопластиків. Це зумовлює необхідність розробки ефективних програм сталого циклу використання полімерних відходів пакування, що передбачає впровадження систем збору, перероблення та повторного залучення пакувальних відходів після завершення строку їх експлуатації. Включення переробки як одного з ключових етапів утилізації є надзвичайно важливим. Для традиційних пластиків, що не здатні до природного розкладу, рециклінг вважається найбільш раціональним способом поводження з відходами. Для біорозкладних біопластиків переробка нерідко залишається поза увагою, оскільки їхню здатність до біодеградації помилково вважають єдиним або цілком достатнім шляхом утилізації. Збільшення обсягів вторинної переробки відходів є економічно доцільним. Застосування механічної і хімічної технологій повторної переробки не лише мінімізує обсяги відходів, що надходять на полігони, а й сприяє збереженню природних ресурсів і підвищенню ефективності використання вихідної сировини, формуючи основу для циркулярної економіки у сфері пакування. Важливою передумовою підвищення ефективності утилізації біопластикового пакування є створення окремих потоків збору відходів в залежності від їх фізико-хімічних властивостей.

Ключові слова: біопластики, екологічне пакування, переробка, циркулярна економіка.

Постановка проблеми. Процеси виробництва та споживання продукції неминує супроводжуватися утворенням різних видів відходів. Для інтеграції у модель циркулярної економіки виробники пакувальних матеріалів повинні ще на етапі проєктування передбачати подальше управління та утилізацію застосованих матеріалів. Такий підхід є складовою системи управління відходами, спрямованої на підвищення рівня переробки пакування та замикання матеріальних потоків у виробничо-споживчому циклі [1].

Біопластиками вважають матеріали, що мають біологічне походження та/або здатність до біологічного розкладання. Заміна традиційних полімерів на біопластики не забезпечує автоматичного розв'язання екологічних проблем, пов'язаних із виснаженням природних ресурсів і накопиченням пластикових відходів. Для переходу до справді сталої моделі застосування біопластиків необхідно розробити та впровадити ефективні системи їхньої утилізації після завершення терміну експлуатації виробу. Ця вимога стосується всіх типів біопластиків, незалежно від їхньої здатності до біодеградації.

Біологічне розкладання часто розглядають як єдиний прийнятний спосіб утилізації біопластиків, однак цей процес не дозволяє відновити матеріали або мономери для їх повторного використання у виробництві. Натомість переробка винна стати ключовим напрямом утилізації біополімерів. Реальна екологічна та економічна цінність полягає у вторинній переробці відходів, зокрема механічній та хімічній. Переробка не лише зменшує обсяг пакувальних відходів, що утворюються після використання, а й сприяє збереженню природних ресурсів, забезпечуючи раціональне використання сировини.

Зважаючи на те, що у сфері пакування біопластики ще тривалий час співіснуюватимуть із традиційними пластиками, особливо важливо визначити оптимальні шляхи їх утилізації для кожного з найбільш поширених типів матеріалів.

Метою статті є аналіз сучасного стану виробництва і використання біопластику для пакування та особливостей переробки відходів біопакування як інструменту сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Пластикові пакувальні матеріали мають ряд переваг, що забезпечує їм домінуюче становище на ринку пакування. Близько 95% пластику, що використовується для пакування, утилізується одразу після першого використання. Близько 42% відходів пластикової упаковки, що утворилися в Європі зібрано для переробки у 2020 році, 39,5% було відправлено на енергетичну рекуперацію (спалювання), а 18,5% було захоронено на сміттєзвалищах. Прогнози свідчать, що до 2050 року на звалища або в природне середовище може потрапити до 12 мільярдів тонн пластикових відходів [2]. Ще більш тривожним є те, що мільйони тонн пластику опиняється в морських екосистемах, де він поступово розкладається на мікропластик, забруднюючи воду та біосферу [2].

Ці загрози, разом з тим фактом, що більшість пластмас виготовляються з невідновлюваних джерел, стимулюють інтенсивні дослідження та розробку сталих альтернатив — таких самих ефективних, але екологічно безпечніших матеріалів.

Біопластик вважається перспективною заміною традиційного пластику. Згідно з визначенням, наданим Європейською асоціацією біопластику, термін «біопластик» охоплює матеріали, які є або виготовленими з біологічної сировини, або здатними до біологічного розкладу, або поєднують обидві ці характеристики [3].

Сучасні дослідження у галузі біорозкладних пакувальних матеріалів показують широкий спектр можливостей щодо їх використання [4, 5]. З огляду на екологічні виклики сучасності та завдання щодо сталого розвитку світової спільноти, дослідження в галузі біорозкладних пакувальних матеріалів спрямовані на покращення

ефективності використання біопакування[6, 7]. Дослідження проводяться щодо властивостей і переробки пакування на основі біопластику [8, 9].

Біорозкладний пластик тривалий час вважався більш безпечною для довкілля альтернативою традиційним синтетичним полімерним матеріалам через здатність до розкладу у незначні проміжки часу. Заміна звичайних пластмас біопластиками не обов'язково вирішує проблеми з утилізацією відходів пакування. [9]. Сучасні дослідження свідчать, що ситуація набагато складніша. Дослідники Піао, Аг'ей Боак'є та Яо підкреслюють, що сам факт біорозкладання не гарантує повну безпечність для природи. У своїй роботі, опублікованій у журналі *Nature Chemical Engineering* у 2024 році, вони представили результати масштабного дослідження, що кардинально переглядає поширені уявлення про біопластики [10]. Після розпаду біопластик утворює мікрочастинки, які можуть чинити неочікуваний і потенційно небезпечний вплив на екосистеми. Такі частинки здатні накопичуватись у живих організмах (біоаккумуляція) та виявляти токсичні властивості, які не враховувалися раніше при оцінці безпечності біорозкладних матеріалів. Вивільнення мономерів та добавок під час деградації діє як біохімічний стресор для мікробних угруповань. Однією з найсерйозніших проблем, пов'язаних з біорозкладним мікропластиком, є його здатність взаємодіяти з іншими забруднювальними речовинами у довкіллі. Як зазначають автори дослідження, "не всі біорозкладні полімери однакові з погляду безпеки для довкілля"[10].

Виклад основного матеріалу дослідження. Протягом останніх десятиліть активізація науково-дослідних робіт у галузі полімерних матеріалів сприяла появі на ринку широкого спектра біопластиків, що викликають значний інтерес з боку промисловості. До найбільш перспективних і комерційно важливих біополімерів належать полімолочна кислота (PLA), полігідроксіалканоати (PHA), полібутиленсукцинат (PBS), термопластичний крохмаль (TPS), а також біополіетилентерефталат (біоПЕТ) і біополіетилен (біоПЕ). Останні два матеріали характеризуються властивостями, подібними до традиційних нафтохімічних полімерів, що забезпечує їх сумісність з існуючими виробничими технологіями та спрощує інтеграцію в ринок.

Згідно з аналітичними даними (Research Nester), обсяг глобального ринку біопластиків у 2025 році перевищив 16,96 млрд доларів США [11]. Прогноз на 2026 рік свідчить про подальше зростання ринку до 19,45 млрд доларів США. Середньорічний темп зростання оцінюється на рівні 16,3 %, що вказує на динамічний розвиток галузі. Очікується, що до 2035 року загальна вартість ринку біопластиків досягне приблизно 76,78 млрд доларів США, що підтверджує його стратегічне значення для переходу до екологічно орієнтованих технологій та циркулярної економіки. Цьому сприяє законодавча, фінансова підтримка у США та країнах Європи, нові технологічні розробки і практичні кроки щодо переробки біопластиків. Стандартизація маркування упаковки допоможе збільшити об'єми сортованих відходів і врегулювати переробку. Згідно аналітичних досліджень, в ЄС близько 73% споживачів схильні купувати екологічні продукти [11].

Біопластики використовуються у широкому спектрі секторів економіки, проте провідну позицію серед напрямів їх застосування займає пакування. Цей сегмент

становить понад 53 % від загального обсягу виробництва біопластиків. Очікується, що частка пакування на ринку біопластиків становитиме близько 60% до 2035 року. [11]. Це зумовлено прагненням знизити вплив відходів пакування на навколишнє середовище. До пакувальної продукції з біополімерів належать як одноразові вироби (пакети, пакети-маєчки, плівки, контейнери), так і вироби з довшим терміном використання, зокрема пляшки та формовані ємності. Вибір типу біопластику для виготовлення пакування залежить від тривалості зберігання упакованого продукту та необхідних бар'єрних і експлуатаційних характеристик матеріалу [12]. Для товарів із коротким терміном придатності (до шести місяців) доцільно застосовувати біополімери з високою швидкістю біологічного розкладання, зокрема на основі крохмалю або целюлози. Такі матеріали забезпечують належний рівень захисту продукції та можуть бути утилізовані шляхом компостування.

Для продукції із середнім терміном зберігання (приблизно до одного року) оптимальним вибором є біопластики з помірною здатністю до біодеградації, наприклад полігідроксіалканоати (PHA). Вони поєднують задовільну функціональність із можливістю розкладання в контрольованих умовах.

У випадку упаковки товарів тривалого зберігання (до п'яти років) на перший план виходять матеріали з підвищеною стабільністю та низькою швидкістю біологічного розкладання. [12] У таких випадках доцільно використовувати біополімери, придатні до вторинної переробки, зокрема полімолочну кислоту. [13]. Вона зберігає цілісність пакування протягом усього періоду використання, а після завершення життєвого циклу може бути перероблена у відповідних технологічних системах.



Рис.1. Структура ринку біорозкладного пакування за галузевим розподілом (згідно [14])

На рисунку 1 представлено структуру ринку біорозкладного пакування за галузевим розподілом. Найбільшу частку ринку — 35% — займає харчова промисловість, що свідчить про значний попит на екологічно безпечне пакування для

свіжих продуктів, м'ясної та рибної продукції, а також напоїв. Другу позицію займає роздрібна торгівля з показником 25%, що відображає активне впровадження біопакування у вигляді пакетів, коробок, контейнерів та одноразового посуду [14].

Фармацевтична промисловість охоплює близько 15% ринку, забезпечуючи пакування для лікарських засобів, медичних виробів та лабораторного обладнання. Така тенденція зумовлена підвищенням вимог до безпечності, стерильності та якості пакувальних матеріалів. Використання біорозкладного пакування в інших галузях незначне - близько 10%. Узагальнюючи, можна зазначити, що харчова промисловість і роздрібна торгівля залишаються провідними рушіями розвитку ринку біорозкладного пакування. Такий розподіл засвідчує поступове розширення сфер застосування біопластиків та посилення ролі екологічних критеріїв у пакувальній індустрії.

На глобальному ринку біорозкладних біопластикових плівок домінує низка провідних виробників. Серед них варто виокремити такі компанії, як BASF SE (Німеччина), Futamura Chemical Co. Ltd. (Японія), Taghleef Industries (Об'єднані Арабські Емірати), Walki Group Oy (Фінляндія) та Kingfa Sci. & Tech. Co., Ltd. (Китай). Значну частку ринку також займають компанії зі США, зокрема Bio Bag Americas, Inc., Avery Dennison Corporation, Plascon Group та Cortec Corporation.

До інших впливових учасників входять: Bi-Ax International Inc. (Канада), Clondalkin Group (Нідерланди), TRIOWORLD INDUSTRIES AB (Швеція), Groupe Barbier (Франція), Paco Label (США), Layfield Group (Канада), Polystar Plastics Ltd (Велика Британія) та Dow Inc. (США). [3] Їхня діяльність формує конкурентне середовище та забезпечує розвиток інновацій у сфері біоплівкових матеріалів.

Близько 60 % продукції, що виробляється провідними компаніями ринку біопластиків, становлять біополімери, здатні до біологічного розкладання [11]. Решта 40 % припадає на матеріали, виготовлені з відновлюваної біологічної сировини, які, попри «зелене» походження, не руйнуються природним шляхом і потребують організації системи вторинної переробки. Це свідчить про те, що «біо»-походження матеріалу саме по собі не гарантує його екологічної безпечності, а вибір способу утилізації має ґрунтуватися на функціональних властивостях конкретного полімеру.

Біорозкладні види біопластиків відкривають можливість альтернативних шляхів їх утилізації, що сприяє зменшенню обсягу відходів, які потрапляють у навколишнє середовище. Водночас біопластики, вироблені з відновлюваної біологічної сировини, дозволяють значно знизити вуглецевий слід на етапі отримання вихідних матеріалів. Таким чином, різні класи біопластиків забезпечують екологічні переваги на різних етапах життєвого циклу. Оцінка впливу на довкілля (LCA) у цьому контексті виступає ключовим регуляторним інструментом, що застосовується на міжнародному рівні для досягнення цілей сталого розвитку [15].

Відповідно до положень Європейської Директиви з управління відходами [1], усі види відходів мають оброблятися згідно з визначеною ієрархією поводження, яка формує пріоритети екологічної політики та правового регулювання. Ієрархія містить п'ять рівнів управління відходами:

1. **Запобігання утворенню відходів** — найвищий пріоритет, що передбачає мінімізацію кількості відходів ще на стадіях проєктування, виробництва та споживання продукції.

2. **Підготовка до повторного використання** — відновлення виробів або матеріалів без необхідності їхньої переробки, що дозволяє максимально зберегти їхню початкову цінність.

3. **Рециклінг (переробка)** — трансформація відходів у вторинну сировину або нові вироби, що дає змогу зменшити споживання первинних ресурсів.

4. **Інші види відновлення, включно з енергетичним відновленням** — спалювання відходів із виробленням енергії, якщо попередні рівні неможливо реалізувати.

5. **Остаточна утилізація** — захоронення або інші способи видалення відходів без їхнього відновлення чи повторного використання; цей варіант є найменш бажаним.

Застосування цієї ієрархії дозволяє не лише зменшити негативний вплив відходів на довкілля, а й забезпечити ефективніше використання ресурсів, підтримуючи концепцію циркулярної економіки.

Для того щоб підвищити екологічну стійкість біопластиків протягом усього їх життєвого циклу, недостатньо лише нарощувати обсяги їх виробництва. Необхідно паралельно створювати та впроваджувати ефективні системи управління відходами, які виникають після споживання таких матеріалів.

Життєвий цикл будь-якого пластику, незалежно від його походження (біологічне чи нафтохімічне) та здатності до біологічного розкладання, може вважатися по-справжньому сталим лише за умови включення переробки як одного з центральних етапів утилізації. Для традиційних пластиків, які не розкладаються природним шляхом, рециклінг давно визнано основним і найраціональнішим методом поводження з відходами. Водночас у випадку біорозкладних біопластиків переробка часто залишається поза увагою, оскільки їх здатність до біодеградації помилково сприймається як єдино правильний або достатній шлях утилізації. Такий підхід є неефективним, адже утилізація без попереднього відновлення матеріалів веде до втрати цінної біологічної сировини, яка могла б бути повторно використана у виробництві. Впровадження систем вторинної переробки біопластиків дозволяє зберегти ресурси та зменшувати екологічне навантаження.

Оптимальний спосіб утилізації та переробки біопластикових відходів пакування після завершення їхнього терміну служби визначається низкою ключових чинників. Це:

- тип біополімеру та його фізико-хімічні властивості,
- обсяги застосування цього матеріалу на ринку, а також
- рівень розвитку інфраструктури збору, сортування й переробки у конкретному регіоні.

Лише за умови врахування цих аспектів можна вибудувати ефективну стратегію управління відходами біопластиків.

З огляду на очікуване зростання частки біопластиків на світовому ринку в найближчі роки, очевидно, що вони ще тривалий час співіснуватимуть із традиційними

пластиками. У цих умовах особливо важливо зосередити увагу на розробці ефективних методів переробки як для біорозкладних, так і для небіорозкладних пластиків, а також на визначенні оптимальних моделей їх утилізації з урахуванням екологічних та економічних аспектів.

Хоча біологічний розклад інколи класифікують як форму утилізації та позначають терміном «органічна переробка», такий підхід фактично не забезпечує повернення матеріалу або його мономерів у виробничий цикл, тобто не сприяє створенню нових виробів на основі цієї сировини. На противагу цьому, інші види переробки — механічна (первинна й вторинна) та хімічна (третинна) — орієнтовані саме на відновлення полімерів і повторне їх використання.

Так, за умови належної чистоти та високої якості відходів, біорозкладні пластики можуть бути перероблені шляхом первинної механічної переробки. Механічна переробка передбачає обробку відходів біопластику фізичними методами, при цьому не змінюється хімічна структура матеріалу. Це відносно дешева, технологічно нескладна, порівняно не шкідлива для довкілля переробка. У цьому випадку з отриманого рециклату виготовляють продукцію аналогічного функціонального призначення, як і з первинного полімеру. Якщо ж якість матеріалу вже не відповідає вимогам для первинної переробки, застосовують вторинну механічну переробку, коли рециклат використовується у виробі з нижчими експлуатаційними характеристиками.

У ситуаціях, коли властивості перероблюваної сировини значно погіршуються і стають неприйнятними для механічної переробки, можливим рішенням є хімічна (третинна) переробка. Хімічна переробка є перспективним науко ємним напрямом у сфері утилізації біопластикових відходів. Цей метод базується на глибокому перетворенні полімерних матеріалів, виділенні мономерів або олігомерів, які можуть повторно використовуватися як сировина для синтезу нових матеріалів [16] (рис. 2). Основною метою хімічної переробки є не тільки зменшення обсягу відходів, але й підвищення ефективності використання матеріалів, збереження ресурсів. Такий підхід дозволяє замикати цикл використання ресурсів, сприяючи формуванню циркулярної економіки.

Якщо ж відхідний матеріал вже не підлягає жодній із зазначених вище технологій переробки, залишаються два альтернативні варіанти: біологічне розкладання або четвертинна переробка, тобто термічне спалювання з утилізацією енергії. Такий підхід вважається найнижчим у пріоритетах ієрархії управління відходами, оскільки не дозволяє зберегти матеріальну цінність ресурсу, а лише повертає частину енергетичного потенціалу.

Одним із найважливіших етапів результативної переробки пластикових відходів є точне розпізнавання та ретельне сортування різних видів полімерів, які потрапляють до побутового сміття. Без правильного розділення пластиків і біопластиків неможливо отримати вторинну сировину високої якості, здатну конкурувати з первинними матеріалами. Саме тому впровадження технологій сортування, які є водночас ефективними та економічно виправданими, має принципове значення для успішного функціонування системи переробки.



Рис. 2. Ієрархія управління відходами пакування із пластику і біопластику

Проте процес сортування значно ускладнюється через велику варіативність полімерних матеріалів у загальному потоці відходів. Додаткову проблему становлять

багатошарові та композитні пакувальні структури, що складаються з декількох різних за природою матеріалів. Такі системи погано піддаються розділенню на окремі компоненти, що істотно обмежує можливості їх повторної переробки.

Особливої уваги потребує ситуація з біорозкладними біопластиками, які активно застосовуються у пакуванні. Ці матеріали нерідко потрапляють одночасно як до потоку традиційного пластику, призначеного для механічної переробки, так і до органічної фракції, що спрямовується на компостування. Подібне змішування потоків спричиняє низку негативних наслідків: зростання витрат на сортування, втрату цінної сировини, зниження якості перероблених полімерів і погіршення характеристик кінцевого компосту. У підсумку це призводить до зниження ефективності обох систем управління відходами та створює бар'єри для реалізації принципів циркулярної економіки.

На нашу думку, досягнення по-справжньому сталої матеріальної економіки є надзвичайно складним завданням. Однак розвиток наукового розуміння проблеми дозволяє краще орієнтуватися в цьому процесі.

Висновки:

1. Розширення виробництва біопластикового пакування має супроводжуватися впровадженням комплексних та науково обґрунтованих стратегій його утилізації. Біопластикове пакування слід розглядати не як відходи після використання, а як вторинний матеріальний ресурс, придатний для подальшого залучення у виробничо-технологічний цикл. Важливо забезпечити ефективну систему збору, сортування та повторного використання таких матеріалів. Інтеграція відходів біопакування в існуючі інфраструктури переробки сприятиме формуванню замкнених циклів матеріального обігу та мінімізації екологічного навантаження на довкілля.

2. Біопластики, що не здатні до природного розкладання, можуть бути ефективно перероблені разом із традиційними нафтохімічними полімерними матеріалами. Водночас для біорозкладних видів біопластиків біодеградація не повинна розглядатися як єдиний прийнятний спосіб утилізації. Доцільним є застосування механічних або хімічних методів переробки, які з позицій екологічної доцільності та економічної ефективності можуть виявитися більш оптимальними.

3. Створення окремих потоків збору відходів біорозкладного біопакування є ключовою передумовою підвищення ефективності їх утилізації.

4. Для забезпечення раціонального використання ресурсів необхідно розробити та впровадити найдоцільніші технологічні підходи до переробки таких відходів із урахуванням фізико-хімічних властивостей та якості вихідної сировини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Директива Європейського Парламенту і Ради 94/62/ЄС від 20 грудня 1994 року про пакування та відходи пакування https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_b05#Text (дата звернення 20.06.2025).
2. PlasticsEurope. Plastics – the Facts 2020. An analysis of European plastics production, demand and waste data (2020) PlasticsEurope: Plastics—the facts 2019. An analysis (дата звернення 19.06.2025).

3. European Bioplastics. Bioplastic materials <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/> (дата звернення 20.06.2025).
4. Cosquer R, Pruvost S, Gouanvé F. Improvement of Barrier Properties of Biodegradable Polybutylene Succinate/Graphene Nanoplatelets Nanocomposites Prepared by Melt Process. *Membranes*. 2021; 11(2):151. <https://doi.org/10.3390/membranes11020151>.
5. Гавриленко О.М., Плішивий Б.М. Світові тенденції розвитку ринку біорозкладних пакувальних матеріалів. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2023. № 47. С. 160-165. DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-9971/2023-47-28>.
6. Krykhovets O., Slobodyanyk V. Preparation and characteristics of films based on polyvinyl alcohol and starch for environmentally friendly packaging. *Advances in Science and Technology*. 2025. Vol. 162. P. 101–108. DOI: 10.4028/p-eR3mdB.
7. Дончак Л. Г., Пилявець В.М. Біорозкладне пакування товарів як елемент сталого розвитку логістичних систем. *Економічний простір*. 2025. № 197. С. 26-31. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/14766>.
8. Kibirkštis E., Mayik V., Zatserkovna R., Vaitasius K., Stepanenko A., Kandrotaitė-Janutienė R., Venytė I., Danilovas P.P. Study of physical and mechanical properties of partially biodegradable LDPE polymeric films and their application for printing and packaging. *Polymer Testing*. 112 (2022) 107646 <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107646>.
9. Fredi G., Dorigato A. Recycling of bioplastic waste: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2021. Vol. 4, no. 3. P. 159–177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.006>.
10. Piao Z., Agyei Boakye A.A. & Yao, Y. Environmental impacts of biodegradable microplastics. *Nat Chem Eng* 1, 661–669 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44286-024-00127-0>.
11. <https://www.researchnester.com/ru/reports/bioplastics-market/3923> (дата звернення 20.06.2025).
12. Ibrahim NI, Shahar FS, Sultan MTH, Shah AUM, Safri SNA, Mat Yazik MH Overview of bioplastic introduction and its applications in product packaging. *Coatings*. 2021. 11:1423. <https://doi.org/10.3390/coatings11111423>.
13. Niaounakis M. Recycling of biopolymers – The patent perspective. *European Polymer Journal*, Volume 114. 2019. P. 464–475, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.027>.
14. Biodegradable Packaging Market Size, Growth, Report (2023-2032). Retrieved from: <https://www.precedenceresearch.com/biodegradable-packaging-market>. (дата звернення 22.06.2025).
15. Joseph K., Eslamian S., Ostad-Ali-Askari K., Nekooei M., Talebmorad H., Hasantabar-Amiri A. Environmental Impact Assessment as a Tool for Sustainable Development. In: Leal Filho, W. (eds) *Encyclopedia of Sustainability in Higher Education*. Springer 2019. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63951-2_170-1.
16. Siracusa V., Blanco I. Bio-polyethylene (Bio-PE), bio-polypropylene (Bio-PP) and biopoly (ethylene terephthalate) (Bio-PET): recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. *Polymers (Basel)*, 12 (8). 2020. P. 1641. <https://doi.org/10.3390/polym12081641>.

REFERENCES

1. Directive 94/62/EC of the European Parliament and of the Council of 20 December 1994 on packaging and packaging waste. (1994). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_b05#Text.
2. PlasticsEurope. (2020). Plastics – the facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticsEurope.
3. European Bioplastics. (2025). Bioplastic materials. 20.06.2025 з <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/>.
4. Cosquer, R., Pruvost, S., & Gouanvé, F. (2021). Improvement of barrier properties of biodegradable polybutylene succinate/graphene nanoplatelets nanocomposites prepared by melt process. *Membranes*, 11(2), 151. <https://doi.org/10.3390/membranes11020151>.
5. Havrylenko, O. M., & Plishyvyi, B. M. (2023). Global trends in the development of the biodegradable packaging materials market. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu*, 47, 160–165. <https://doi.org/10.32782/2413-9971/2023-47-28>.
6. Krykhovets, O., & Slobodyanyk, V. (2025). Preparation and characteristics of films based on polyvinyl alcohol and starch for environmentally friendly packaging. *Advances in Science and Technology*, 162, 101–108. <https://doi.org/10.4028/p-eR3mdB>.
7. Donchak, L. H., & Pyljavets, V. M. (2025). Biodegradable product packaging as an element of sustainable development of logistics systems. *Ekonomichnyi prostir*, 197, 26–31. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/14766>.
8. Kibirkštis, E., Mayik, V., Zatserkovna, R., Vaitasius, K., Stepanenko, A., Kandrotaitė-Janutienė, R., Venytė, I., & Danilovas, P. P. (2022). Study of physical and mechanical properties of partially biodegradable LDPE polymeric films and their application for printing and packaging. *Polymer Testing*, 112, 107646. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107646>.
9. Fredi, G., & Dorigato, A. (2021). Recycling of bioplastic waste: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(3), 159–177. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.006>.
10. Piao, Z., Agyei Boakye, A. A., & Yao, Y. (2024). Environmental impacts of biodegradable microplastics. *Nature Chemical Engineering*, 1, 661–669. <https://doi.org/10.1038/s44286-024-00127-0>.
11. Research Nester. (2025). Bioplastics market report. Отримано 20.06.2025 з <https://www.researchnester.com/ru/reports/bioplastics-market/3923>.
12. Ibrahim, N. I., Shahar, F. S., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Safri, S. N. A., & Mat Yazik, M. H. (2021). Overview of bioplastic introduction and its applications in product packaging. *Coatings*, 11, 1423. <https://doi.org/10.3390/coatings11111423>.
13. Niaounakis, M. (2019). Recycling of biopolymers – The patent perspective. *European Polymer Journal*, 114, 464–475. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.027>.
14. Precedence Research. (2025). Biodegradable packaging market size, growth, report (2023–2032). Отримано 22.06.2025 з <https://www.precedenceresearch.com/biodegradable-packaging-market>.
15. Joseph, K., Eslamian, S., Ostad-Ali-Askari, K., Nekooei, M., Talebmorad, H., & Hasantabar-Amiri, A. (2019). Environmental impact assessment as a tool for sustainable development. In W. Leal Filho (Ed.), *Encyclopedia of sustainability in higher education*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63951-2_170-1

16. Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio-polyethylene (Bio-PE), bio-polypropylene (Bio-PP) and bio-poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. *Polymers*, 12(8), 1641. <https://doi.org/10.3390/polym12081641>.

doi: 10.32403/1998-6912-2025-2-71-181-192

USE OF BIOPLASTICS FOR ECO-FRIENDLY PACKAGING AND FEATURES OF BIOPACKAGING RECYCLING

O. V. Krykhovets

*Lviv Polytechnic National University,
12 S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine
oleksandra.v.krykhovets@lpnu.ua*

This work is devoted to analyzing the advantages and disadvantages of using bioplastic materials in the production of environmentally friendly packaging, as well as researching technologies for their processing. The market for bioplastic materials is showing a stable upward trend, particularly in the packaging sector. Replacing traditional polymers with bioplastics cannot be considered a universal solution to the problems associated with the use of packaging materials. In the near future, both conventional plastics and bioplastics are expected to be used as packaging materials. This necessitates the development of effective programs for the sustainable use of polymer materials, which involves the introduction of systems for the collection, recycling, and reuse of packaging waste after the end of its useful life. The inclusion of recycling as one of the key stages of disposal is extremely important. For traditional plastics that are not capable of natural decomposition, recycling has long been considered the basic and most rational way to manage waste. However, when it comes to biodegradable bioplastics, recycling is often overlooked because their biodegradability is mistakenly considered the only or entirely sufficient method of disposal. This approach is ineffective, as disposal without prior material recovery leads to the loss of valuable bio-raw materials that could be reused in production. Increasing the volume of waste recycling is economically viable. The use of mechanical and chemical recycling technologies not only minimizes the amount of waste going to landfills, but also contributes to the conservation of natural resources and increases the efficiency of raw material use, forming the basis for a circular economy in the packaging sector. An important prerequisite for improving the efficiency of bioplastic packaging recycling is the creation of separate waste collection streams depending on their physical and chemical properties.

Keywords: *bioplastics, eco-friendly packaging, recycling, circular economy.*

Стаття надійшла до редакції 06.10.2025.

Received 06.10.2025.