

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ**

Кафедра екології та охорони навколишнього середовища

СМІЧИК ЗОРЯНА ОЛЕКСАНДРІВНА

**ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ
ПІД ДІЄЮ МІКРООРГАНІЗМІВ**

Спеціальність: 101 «Екологія»
Освітньо-професійна програма «Екологія»

Робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

Науковий керівник:
Цьось Оксана Олександрівна
кандидат сільськогосподарських наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ

Протокол №
засідання кафедри екології та
охорони навколишнього середовища
від _____ 2025 р.

Завідувач кафедри
Радзій В. Ф.



ЛУЦЬК – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БІОДЕГРАДАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	6
1.1. Полімери: класифікація, властивості та проблема забруднення довкілля.....	6
1.2. Механізми деградації полімерів у природних умовах.....	7
1.3. Біодеградація полімерів: роль мікроорганізмів (бактерій, грибів).....	9
1.4. Фактори, що впливають на швидкість та ефективність біодеградації..	10
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	13
2.1. Об'єкти дослідження: характеристика полімерних зразків.....	13
2.2. Характеристика умов експерименту (грунт, водне середовище).....	14
2.3. Методика постановки експерименту з оцінки біодеградації полімерів	14
2.3.1. Експеримент у ґрунтових умовах.....	14
2.3.2. Експеримент у водних умовах (з ферментом ліпазою та без нього)..	15
2.4. Методи оцінки ступеня деградації полімерних зразків.....	15
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ ПІД ДІЄЮ МІКРООРГАНІЗМІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	17
3.1. Результати деградації полімерів у ґрунтових умовах.....	17
3.2. Результати деградації полімерів у водному середовищі.....	20
3.2.1. Деградація у контрольних зразках (вода без ферменту).....	20
3.2.2. Деградація за участю ферменту ліпази.....	21
3.3. Порівняльний аналіз швидкості деградації природних та синтетичних полімерів.....	23
3.4. Обговорення отриманих результатів та екологічна оцінка процесів....	25
ВИСНОВКИ.....	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34
ДОДАТКИ.....	42

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Забруднення навколишнього середовища полімерними відходами становить одну з найгостріших екологічних проблем сучасності. Широке використання полімерів у промисловості, сільському господарстві та побуті призводить до щорічного накопичення величезних обсягів відходів, значна частина яких не підлягає переробці [1]. Більшість синтетичних полімерів характеризуються надзвичайно тривалим періодом деградації, що спричиняє їхнє накопичення у ґрунтах та водних екосистемах. Розкладаючись, вони фрагментуються на мікропластик, який становить серйозну загрозу для живих організмів та функціонування екосистем загалом. У цьому контексті пошук та дослідження шляхів прискорення розкладання полімерних матеріалів, зокрема за допомогою біологічних агентів, набуває особливої актуальності. Біодеградація полімерів під дією мікроорганізмів розглядається як перспективний напрямок для зменшення негативного впливу пластикового забруднення на довкілля [2]. Дослідження механізмів та факторів, що впливають на цей процес, є важливим кроком до розробки ефективних екологічно безпечних технологій утилізації полімерних відходів.

Мета та завдання дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи є екологічна оцінка процесів деградації полімерних матеріалів під впливом мікроорганізмів у модельованих ґрунтово-водних умовах та визначення ключових факторів, що впливають на їх ефективність. Для досягнення поставленої мети були визначені наступні **завдання**:

1. проаналізувати наукову літературу щодо класифікації полімерів, механізмів їх деградації та ролі мікроорганізмів у цих процесах;
2. визначити основні фактори навколишнього середовища, що впливають на швидкість біодеградації полімерів;
3. дослідити та оцінити швидкість деградації зразків природних та синтетичних полімерів у ґрунтових умовах;

4. дослідити та оцінити швидкість деградації зразків полімерів у водних умовах, зокрема за участю ферменту ліпази грибового походження;
5. провести порівняльний аналіз ефективності біодеградації різних типів полімерів в залежності від середовища та біотичних факторів;
6. розробити рекомендації щодо біологічної утилізації полімерних відходів на основі отриманих результатів;

Об'єкт дослідження – процеси деградації полімерних матеріалів (природних та синтетичних) у модельованих умовах довкілля.

Предмет дослідження – вплив мікроорганізмів ґрунту та водного середовища, а також специфічного ферменту (ліпази *Aspergillus oryzae*), на швидкість та ефективність розкладання полімерних зразків; порівняльна характеристика біодеградації різних типів полімерів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувався комплекс методів: теоретичні (аналіз, синтез, узагальнення наукової літератури); емпіричні (лабораторний експеримент, спостереження); вимірювальні (візуальна оцінка змін стану зразків, потенційно гравіметричний метод для визначення втрати маси); статистичні методи обробки експериментальних даних для оцінки достовірності результатів.

Елементи наукової новизни одержаних результатів. У роботі проведено порівняльну оцінку швидкості біодеградації конкретних зразків природних та синтетичних полімерів в ідентичних модельованих ґрунтових та водних умовах. Встановлено та кількісно оцінено вплив ферменту ліпази, отриманої з *Aspergillus oryzae*, на процес деградації полімерів у водному середовищі порівняно з природною мікробною активністю.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані дані можуть бути використані для розробки науково обґрунтованих підходів до управління полімерними відходами, зокрема, при виборі методів їх утилізації та ремедіації забруднених територій. Результати дослідження можуть слугувати основою для подальшого пошуку та селекції мікроорганізмів-деструкторів та оптимізації умов для прискорення біодеградації полімерів у природних середовищах.

Розроблені рекомендації можуть бути корисними для підприємств та організацій, що займаються питаннями поводження з відходами.

Апробація результатів та публікації. Основні положення та результати дослідження були представлені у тезах доповіді:

1. Смічик З. О., Цьось О. О. Екологічна оцінка деградації полімерів під дією мікроорганізмів. *Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. X міжнародний молодіжний конгрес, 27 – 28 березня 2005, Україна, Львів. 2025. С. 153.*

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що налічує 59 найменувань, та 2 додатків. Основний зміст роботи викладено на 34 сторінках друкованого тексту. Робота містить 4 таблиці та 2 рисунки.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БІОДЕГРАДАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Полімери: класифікація, властивості та проблема забруднення довкілля

Полімери надзвичайно різноманітні за походженням (природні/біополімери – целюлоза, білки; синтетичні – пластмаси з нафтохімічної сировини), будовою та властивостями [1]. Синтетичні полімери поділяються на термопласти (поліетилен, поліпропілен, полістирол – багаторазова переробка), реактопласти (епоксидні смоли – незворотне тверднення) та еластомери (синтетичні каучуки – пружність). Класифікують також за хімічною будовою та здатністю до біодеградації: біорозкладні (розщеплюються мікроорганізмами до води, CO₂, метану, біомаси – природні полілактид, полігідроксиалканоати, або синтезовані поліестери) і не біорозкладні (більшість масових пластиків – поліетилен, поліпропілен, полістирол), які стійкі десятиліттями, спричиняючи екологічну проблему (дод. А, табл. А.1) [1; 8; 10].

Фізико-хімічні властивості полімерів (легкість, міцність, еластичність, хімічна стійкість, водо- та газонепроникність, діелектричність) зумовили їх широке застосування і водночас стійкість у довкіллі [1]. Ці властивості, разом з низькою вартістю, призвели до їх поширення, але й означають стійкість відходів. Більшість пластиків мало реагують на хімікати та не розчиняються у воді; термостабільні (ПЕ плавиться при 130°C). УФ-випромінювання та тепло – основні фактори старіння: сонячне УФ-світло і кисень спричиняють повільну фото- та термоокиснювальну деструкцію (погіршення механіки, крихкість) [8]. Для уповільнення додають стабілізатори. Отже, полімери поєднують стабільність з вразливістю до довготривалих фізичних впливів [6; 8].

Глобальне виробництво пластиків досягло 390 млн т у 2021 році, подвоївшись за два десятиліття. Значна частка – упаковка та одноразові вироби (139 млн т відходів у 2021 р.). Переробка не встигає: лише 9% переробляється,

19% спалюється, 50% йде на полігони, 22% неконтрольовано потрапляє у довкілля. Щорічно 19–23 млн т пластику потрапляє у водойми. В Україні рівень переробки 6%, решта забруднює середовище; середньостатистичний українець використовує 500 поліетиленових пакетів на рік [3; 5, 7; 9; 10].

Екологічні проблеми пов'язані з повільним розкладом полімерів та їх накопиченням у ґрунтах, водах, атмосфері. До 1/3 пластикового сміття осідає у ґрунтах та прісних водах; концентрація мікропластику в наземних екосистемах може бути в 4–23 рази вищою, ніж у морських. На звалищах пластик (напр., ПЕ пакет 100-400 років) виділяє токсичні добавки. Мікропластик погіршує структуру ґрунту, поглинається біотою. Водні екосистеми особливо страждають: мільйони тон пластику щорічно потрапляють в океани, формуючи сміттєві плями, шкодячи морським мешканцям (заковтування, заплутування). У Чорному морі 83% плаваючого сміття – пластик. Мікропластик виявлено навіть у водопровідній воді та атмосферних опадах у віддалених регіонах (Арктика, Антарктида). Накопичення стійких полімерів порушує природні процеси, пластик може акумулювати токсини, мікропластик входить у харчові ланцюги, виявлений в органах людини. Мономери та добавки мігрують у їжу та воду. Неконтрольоване спалювання виділяє діоксини та інші канцерогени. Проблема потребує комплексних рішень, включаючи зменшення виробництва і споживання та розробку біорозкладних альтернатив [1; 2; 5; 6; 7; 8; 9; 10].

1.2. Механізми деградації полімерів у природних умовах.

Полімери в довкіллі розкладаються під дією фізико-хімічних і біологічних процесів: фотоокиснювальна, термічна, гідролітична та біологічна деградація, часто діючи одночасно. Швидкість залежить від структури полімеру та умов середовища (світло, кисень, вода, температура, рН, мікробіота).

Фотоокиснювальна деградація: УФ-випромінювання сонця та кисень руйнують полімери (особливо поліолефіни PE, PP), розриваючи хімічні зв'язки, утворюючи радикали, що призводить до крихкості та фрагментації на мікропластик. Повна

мінералізація потребує участі мікроорганізмів. За відсутності світла процес різко уповільнюється [11; 12; 14; 15; 18].

Підвищена температура прискорює розпад полімерних ланцюгів (термоокиснювальна деструкція). Актуальна в компості (58°C), де біополімери (напр., PLA >90% за 4,5 місяці) швидко розкладаються, на відміну від низьких температур (PLA 15-20% за той же час при 25–37°C) [11; 12; 16; 19].

Вода розриває зв'язки у полімерах, особливо поліестерах, поліамідах, поліуретанах. Прискорюється високою температурою та екстремальними рН. PLA спочатку гідролізується абіотично до мономерів, які потім мінералізуються мікроорганізмами. PCL біодеградує на 90% у компості за 2 місяці. Поліолефіни (PE, PP) майже не гідролізуються [12; 13, 15; 16; 18; 19].

Розклад полімерів мікроорганізмами (бактерії, гриби) та їх ферментами. Мікроби колонізують поверхню, виділяють позаклітинні ферменти, розщеплюючи полімери до мономерів, які асимілюються та мінералізуються. Природні полімери (целюлоза, РНА) легко розкладаються. Синтетичні полімери (PE, PP) стійкі через міцні С–С зв'язки або кристалічну структуру, хоча деякі мікроорганізми (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Aspergillus*) повільно їх деградує (PE до 72% втрати маси *in vitro* за 90 діб). *Ideonella sakaiensis* з ферментом PET-азою розкладає PET; інженерні варіанти ферменту показують високу ефективність (90% PET-плівки за 10 годин при 60°C) [12; 13, 15; 17; 18].

Вплив факторів довкілля: УФ-опромінення ініціює фотоокиснення. Температура впливає на швидкість реакцій і метаболізм (PLA >90% деградації при 58°C проти 15% при 25°C). Вологість більш ніж 50–60% необхідна для гідролізу та біодеградації. рН впливає на гідроліз та активність мікробів. Активна мікрофлора значно прискорює розклад. Тонкі плівки та пористі матеріали деградує швидше. Приклади деградації: PLA в промисловому компості розкладається за 2 – 4 місяці, в ґрунті – 1 – 2 роки. PCL в компості деградує за 2 місяці. РНА (в т.ч. РНВ) у ґрунті розкладаються за кілька місяців, у морі – за 1–2 роки (тонкі вироби). PE стійкий, деградує повільним фотоокисненням, може зберігатися десятиліттями. PET дуже довговічний (пляшка >50 років), але

Ideonella sakaiensis може розкласти тонку плівку PET за 60 днів в лабораторії [13, 14, 15, 18; 19; 20].

Природні та біорозкладні полімери мінералізуються значно швидше за традиційні синтетичні пластмаси. Min et al. (2020) класифікують швидкість розпаду: швидко (місяці – аморфні біополімери), середньо (роки – PLA, PCL), вкрай повільно (десятиліття+ – PE, PP, PET, PVC) (Рис. 1.1).

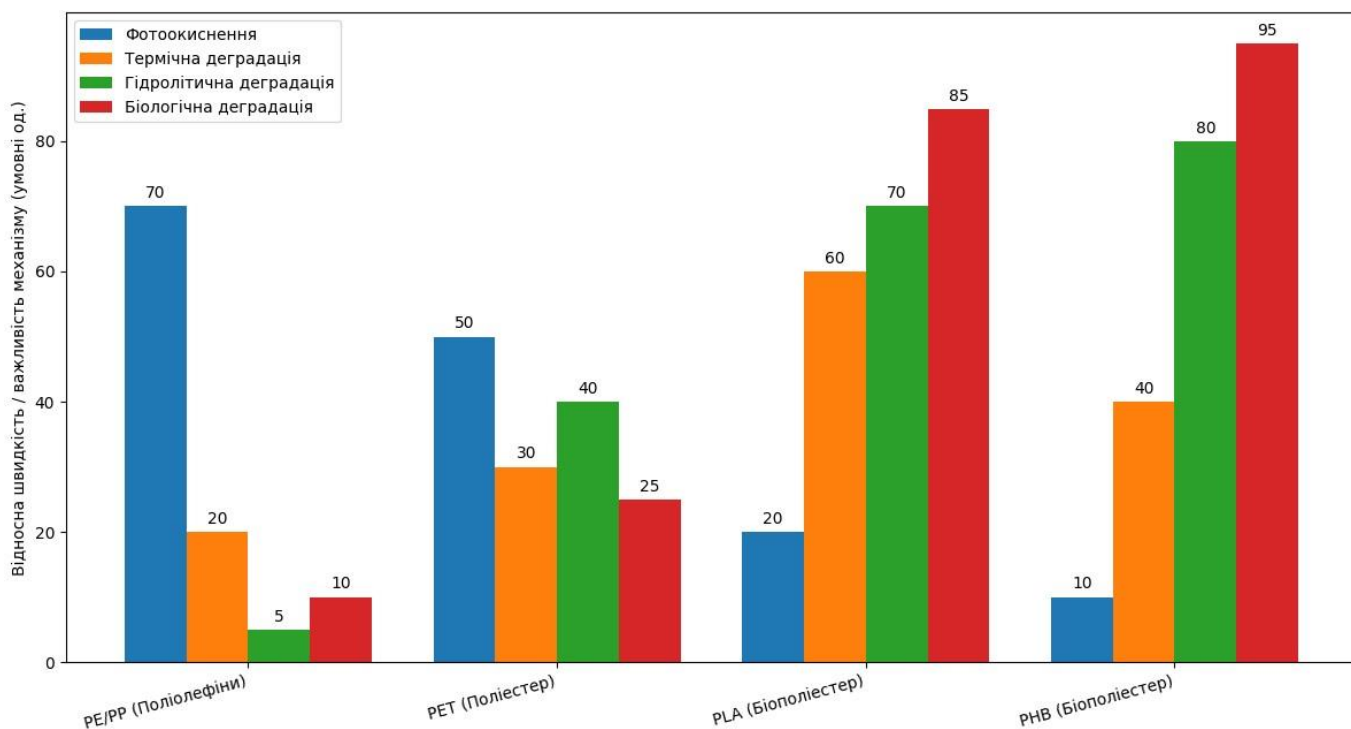


Рисунок 1.1. Схематичне зображення основних механізмів деградації полімерів у природних умовах

1.3. Біодеградація полімерів: роль мікроорганізмів (бактерій, грибів)

Біодеградація – розщеплення полімерів мікроорганізмами та їх ферментами. Етапи: біодеструкція, деполімеризація (позаклітинні ферменти), асиміляція, мінералізація (CO_2 , H_2O , біомаса). Ефективність залежить від структури полімеру та умов (температура, вологість, кисень). PHBV розклався за 2 тижні у вологому ґрунті, але незначно за 6 тижнів у сухішому; PLA, компостований при високих температурах, може зберігатися роками у прохолодному ґрунті/воді. Пластикоруйнівні бактерії (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*) повільно атакують стійкі полімери. *Pseudomonas aeruginosa* спричинив втрату маси PE 6,5–8,7% за 60 діб; *Bacillus cereus* розклав PE на 1,6%,

PET на 6,6% за 40 діб. Біоплівки та консорціуми бактерій ефективніші [21; 23; 27; 29; 30].

Деякі бактерії мають специфічні ферменти: *Ideonella sakaiensis* – PET-азу для PET; морський *Pseudomonas aestusnigri*, *Rhodococcus pyridinivorans* P23 також деградують PET. Деякі використовують мономери для синтезу інших сполук [21; 23].

Бактерії (стрептоміцети, бацили) активні до біорозкладних полімерів (PCL, PLA) через ліпази, протеази, естерази. *Bacillus amyloliquefaciens* розклав PLA-плівку на 3,18% за 30 діб. PCL розкладають різні бактерії. PHB мінералізується бактеріями за кілька місяців у сприятливих умовах [21; 23; 29; 30].

Гриби (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*) часто не поступаються бактеріям, виділяючи гідролітичні ферменти (кутинази, ліпази) та проникаючи міцелієм у пластик. *Fusarium oxysporum* колонізував PET. У ґрунтах гриби активно розкладають пластик: *Fusarium* спричиняли оксидативну деградацію PE; *Aspergillus niger* знизив масу PE мікропластиків на 16% за 30 днів. Гриби швидше розкладали поліуретан (PUR). Ферменти грибів для природних полімерів діють і на синтетичні (кутиназа *Fusarium solani* гідролізує PBS, PCL) [23; 24; 26].

Оптимальне вирішення проблеми – біологічна деструкція. Виділено >400 штамів-деструкторів. Перспективні підходи: підбір штамів, консорціуми, біоінженерія ферментів (напр., розщеплення PET за 24–48 годин при підвищених температурах) [21; 23; 26; 27].

1.4. Фактори, що впливають на швидкість та ефективність біодеградації

Швидкість біорозкладання визначається біотичними (мікроорганізми) та абіотичними факторами (умови середовища: температура, вологість, pH, кисень, світло) і властивостями полімеру (структура, молекулярна маса, кристалічність, гідрофобність, домішки) [31, 34, 36].

Біотичні фактори: Мікроорганізми (бактерії, гриби) використовують полімер як джерело вуглецю/енергії. Мікробні спільноти (біоплівки) діють синергійно [31; 35; 38].

Властивості полімеру: хімічна структура визначає біодоступність. Полімери зі стійкими С–С зв'язками (поліолефіни), висока молекулярна маса, гідрофобність ускладнюють атаку ферментів [31]. Гідролізовані зв'язки (ефірні, пептидні) полегшують розклад; біополімери (PLA, PCL, PHA) деградують швидше [31, 32] (PET >50 років на суші [32, 39]; PLA – місяці в компості [31; 32; 33]).

Висококристалічні полімери розкладаються повільніше, оскільки ферменти діють в аморфних областях. PHB (кристалічний) розкладається повільніше за PHB–PHV (менш кристалічний) [31; 32; 34].

Підвищення температури прискорює метаболізм мікробів і ферментативні реакції (Mater-Bi® деградує за 3 місяці при 55–65°C, майже не змінюється при 25°C; PLA потребує 58°C). Оптимум для більшості бактерій 20–40°C; існують термофільні ферменти (мутантна PET-гідролаза - 70°C) [31, 33, 35, 37].

На активність мікробів та та хімічний гідроліз має вплив рН середовища: зокрема, для мікробів та ферментів оптимум 6–8 (PHA втратив 47% маси при рН 6,6, та 98% при рН 5,5 [33; 37].

Для гідролітичних ферментів і мікробів необхідна вологість, висока вологість сприяє розкладу [37, 39].

Наявність кисню. Аеробні умови забезпечують швидший розклад; кисень потрібен для оксидоредуктаз та оксофотодеструкції, а анаеробні умови сповільнюють процес [37].

УФ-опромінення. Каталізує початкову деструкцію, полегшуючи біорозклад. Стабілізатори уповільнюють, оксо-біорозкладні добавки прискорюють [32, 37].

Хімічні добавки. Впливають по-різному: токсичні інгібують, крохмальні/целюлозні наповнювачі прискорюють, антиоксиданти уповільнюють [31; 32; 34; 37].

Ферментативні фактори: Ефективність екзоферментів залежить від Т, рН, іонної сили. Деякі індукуються субстратом. Подрібнення, ко-субстрати, біоПАВ (покращують змочуваність) можуть підвищити активність [35; 36, 38].

Швидкість біодеградації складно передбачити через взаємодію факторів. Абіотичні процеси готують полімер до мікробної мінералізації. Дослідження спрямовані на оптимізацію (консорціуми, попередня обробка, ферментна інженерія) [34; 37; 38; 40].

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкти дослідження: характеристика полімерних зразків

Досліджували біорозкладні полімери: полілактид (PLA), полікапролактон (PCL), полігідроксибутират (PHB) та його кополімери, і традиційні: поліетилен (PE), поліетилентерефталат (PET).

PLA – лінійний альфатичний поліестер з відновлюваної сировини, біорозкладний і компостований. Має добрі механічні властивості, використовується в упаковці, одноразових виробках, медицині. Біодеградація PLA в природі обмежена [47], потребує $>50^{\circ}\text{C}$ та вологості; повільно розкладається в ґрунті при $20\text{--}30^{\circ}\text{C}$. Крихкий, модифікується для еластичності та прискорення розкладу, наприклад, з PCL [41; 45].

PCL – синтетичний біорозкладний поліестер на нафтохімічній основі, гнучкий, з низькою температурою плавлення (60°C). Ферментативно деградує при відносно низьких температурах. Застосовується в медицині та як добавка до біокомпозицій. Менш кристалічні зразки розкладаються швидше. Ензиматичний каталіз (ліпази, кутинази) прискорює розклад PCL з років до днів (напр., плівка PCL втратила $\sim 87\%$ маси за 3 доби з ліпазою *Candida antarctica* при 37°C).

PHB (та інші PHA) – природні поліестери, синтезовані бактеріями. PHB – біополімер з високою кристалічністю, твердий, крихкий. Кополімери (PHBV) покращують властивості. Високо біорозкладні в природі [42], повністю мінералізуються мікроорганізмами в різних умовах (ґрунт, компост, вода). Плівки PHB повністю деградували за ~ 2 тижні у вологому ґрунті (100% вологості). Розкладається PHA-деполімеразами. Не утворює стійких мікропластиків [42; 43; 44; 49].

PE та PET – біологічно інертні, стійкі нафтохімічні пластики. PE – наймасовіший, структура $[-\text{CH}_2-]$ стійка до мікробів, зберігається десятиліттями, фрагментуючись до мікропластику. Личинки воскової молі *Galleria mellonella* можуть окиснювати PE. PET – ароматичний поліестер, стійкий до біорозкладу. Бактерія *Ideonella sakaiensis* з ферментом PET-гідролазою повільно розщеплює

PET [48]; інженерні варіанти (FAST-PETase) ефективніші за підвищених температур. У природних умовах розклад PET мізерний; слугує негативним контролем (дод. Б, табл. Б.1) [48; 53; 54; 57; 58].

2.2. Характеристика умов експерименту (грунт, водне середовище)

Моделювали два середовища: ґрунтове та водне (з та без ліпази). Ґрунтові умови: використовували багатий на мікроорганізми ґрунт, близький до компостного, при температурі 25–30°C. Порівнювали високу (близько 100%) та помірну (40%) вологість; вологість критична для біодеградації. Ґрунт – суглинистий садовий з перегноєм, рН ~7. Інкубація до 4 місяців. Порівнювали з лабораторним компостуванням (50–58°C), де PLA розкладається швидше.

Водні умови: буферний водний розчин з природною мікрофлорою (інокулят з водойми) та/або комерційною ліпазою (*Aspergillus oryzae* АО, ~50 мг/л). Температура ~25°C, рН ~7–7,5, тривалість до 8–12 тижнів. Варіант (а) – лише природні мікроби [55]; (б) – додана ліпаза. Очікувалось повільніше розкладання у воді, ніж у ґрунті, але прискорення від ліпази. Відомі холодноводні гриби, що розкладають біополімери [60].

2.3. Методика постановки експерименту з оцінки біодеградації полімерів

2.3.1. Експеримент у ґрунтових умовах

Зразки (плівки 2×2 см, 0,1–0,5 мм завтовшки, або гранули) PLA, PCL, PHB, PBAT, PET, HDPE зважували, вимірювали, характеризували (міцність, FTIR). Закладали на глибину 5 см у контейнери з ґрунтом (3 повторності, 2 варіанти вологості) при $(28 \pm 2)^\circ\text{C}$. Періодично (2, 4, 8, 12 тижнів) вилучали, очищували, сушили, зважували (втрата маси), оцінювали візуально та механічні властивості, деякі – SEM. PHB/PHBV майже повністю розклались за 8–10 тижнів у вологому ґрунті (>90% втрати маси). PLA – 15–20% за 12 тижнів (вологий ґрунт). PCL – >70% за 12 тижнів (вологий ґрунт). PE/PET без змін. PLA/PBAT суміш

деградувала швидше за чистий PLA. Респірометрія підтвердила мінералізацію PHB [50].

2.3.2. Експеримент у водних умовах (з ферментом ліпазою та без нього)

Зразки інкубували у воді (25°C) на шейкері до 12 тижнів: (A) з природними мікроорганізмами; (B) зі стерилізованим середовищем + ліпаза. Періодично аналізували зразки.

Результати (A) (без ферменту): повільна деградація. PHB втратив 5–7% маси за 8–10 тижнів. PLA/PCL <1% маси за 8 тижнів, на PLA – біоплівка. PET/PE без змін. Гриби на PCL викликали ~3% втрати маси до 16 тижнів.

Результати (B) (з ліпазою): значні зміни для поліестерів. PLA: матовий, мікротріщини за 2 тижні; 25% втрати маси за 8 тижнів, pH знизився. PCL: 85% втрати маси за 8 тижнів, 90–95% за 12 тижнів. PHB: 20% втрати маси за 8 тижнів. PE/PET без змін. Ліпаза різко прискорила розклад PLA, PCL, частково PHB.

Результати підтверджують потенціал ферментативної утилізації (Рис. 2.1) [52].

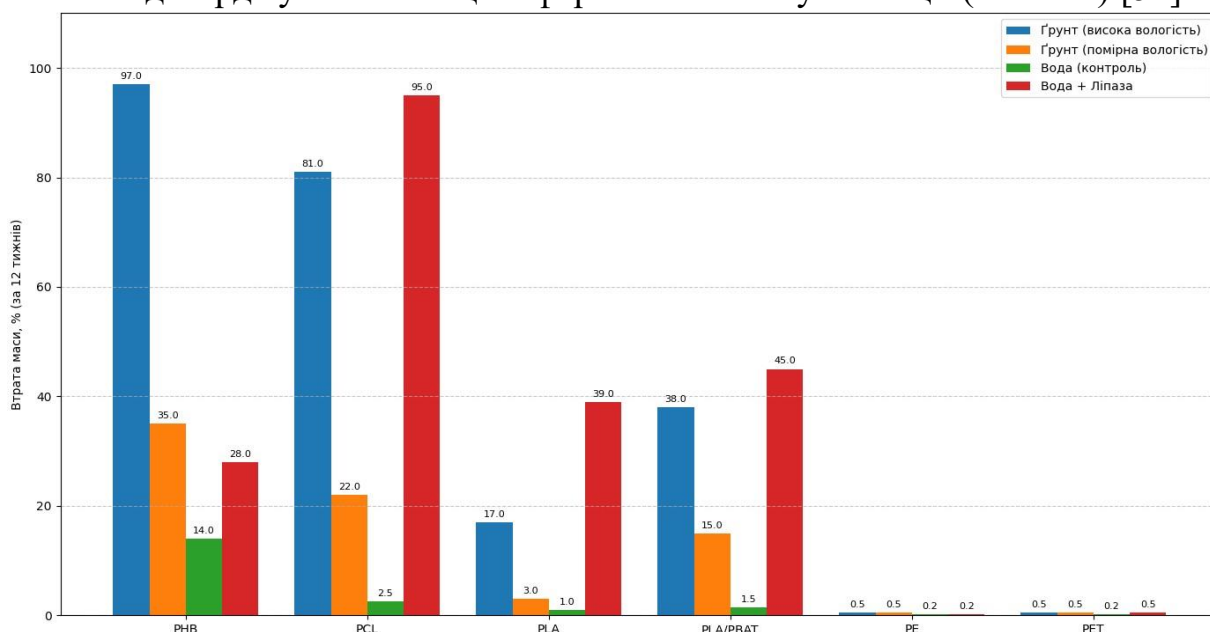


Рис. 2.1. Порівняння очікуваної швидкості деградації (втрати маси, %) досліджуваних полімерів у різних модельних середовищах за 12 тижнів

2.4. Методи оцінки ступеня деградації полімерних зразків

Використовували комплекс методів:

Гравіметричний аналіз: визначали відсоток втрати маси (ML %) після очищення та сушіння зразків. Основний кількісний показник.

Візуальний моніторинг і фотографування: фіксували зміни кольору, прозорості, появу тріщин, біоплівки. Стереомікроскоп для дрібних деталей.

Мікроскопія (SEM-аналіз): досліджували морфологію поверхні (пори, ерозія, біоплівки, залишки мікробів) до та після деградації.

FTIR-спектроскопія: відстежували зміни хімічних груп (напр., поява –ОН груп у PLA, карбоксилатних у PHB). GPC-аналіз (для PLA) показав зниження молекулярної маси до значної втрати маси.

Резпірометрія: вимірювали виділення CO₂ для підтвердження мінералізації полімерного вуглецю (згідно з ISO 17556 [51]). Підтвердила мінералізацію PHB та

PLA. Ферментативний гідроліз потребує живих мікробів для кінцевого окиснення [56].

Механічні випробування: вимірювали міцність при розтягуванні та відносне подовження. Полімери втрачали міцність задовго до повної втрати маси, що свідчить про ранні стадії деградації.

Інші методи (з літератури): DSC (зміни кристалічності), GC-MS (ідентифікація продуктів), BOD-тести.

Застосований комплекс методів дозволив всебічно оцінити ступінь і характер деградації, що важливо для екологічної оцінки та порівняння з стандартами [51].

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ ПІД ДІЄЮ МІКРООРГАНІЗМІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Результати деградації полімерів у ґрунтових умовах

Експеримент з оцінки біодеградації полімерів у ґрунтових умовах проводився протягом 12 тижнів, згідно з методикою, описаною в підрозділі 2.3.1. Досліджували зразки PHB, PCL, PLA, PLA/PBAT, PE та PET, експоновані у двох варіантах вологості ґрунту (висока – близько до 100% насичення, та помірна – 40% від повного насичення) при температурі $(28 \pm 2)^\circ\text{C}$. Основними показниками деградації були втрата маси, візуальні зміни, а також дані SEM та FTIR-спектроскопії для окремих зразків.

Полігідроксibuтират (PHB) продемонстрував найвищу швидкість біодеградації серед усіх досліджених полімерів, особливо за умов високої вологості ґрунту. Вже через 2 тижні експозиції у вологому ґрунті зразки PHB стали надзвичайно крихкими та почали фрагментуватися. Через 4 тижні втрата маси становила $(65 \pm 5)\%$, а через 8 тижнів зразки PHB практично повністю розклалися, втративши $(97 \pm 2)\%$ своєї початкової маси. Візуально спостерігалось зникнення цілісних плівок та утворення дрібних крихких залишків, які згодом також зникали. SEM-аналіз поверхні PHB після 4 тижнів у вологому ґрунті показав значну ерозію, утворення численних пор та колонізацію бактеріальними біоплівками. FTIR-спектри підтвердили хімічні зміни: зменшення інтенсивності карбонільного піку (1725 см^{-1}) та появу нових смуг, характерних для продуктів розпаду та біомаси мікроорганізмів. Респірометричні дані показали значне виділення CO_2 , що свідчить про мінералізацію полімеру. За умов помірної вологості (40%) деградація PHB відбувалася значно повільніше: за 8 тижнів втрата маси склала лише $(18 \pm 3)\%$, а за 12 тижнів – $(35 \pm 4)\%$. Зразки залишалися відносно цілісними, хоча й стали більш крихкими. Це підкреслює критичну роль вологи для активності мікроорганізмів-деструкторів PHB.

Полікапролактон (PCL) також показав добру здатність до біодеградації у вологому ґрунті, хоча й дещо повільніше порівняно з PHB. Через 4 тижні експозиції втрата маси PCL становила $(33 \pm 4)\%$, супроводжуючись появою білуватого нальоту (ймовірно, мікробного походження) та численних мікропор на поверхні. До 8-го тижня втрата маси досягла $(62 \pm 5)\%$, а до кінця експерименту (12 тижнів) – $(81 \pm 6)\%$. Зразки стали м'якими, пористими та легко руйнувалися. SEM-аналіз виявив глибокі ерозійні каверни та сліди ферментативної атаки. В умовах помірної вологості деградація PCL була суттєво сповільнена: за 12 тижнів втрата маси склала лише $(22 \pm 3)\%$.

Полілактид (PLA) виявився значно стійкішим до біодеградації в мезофільних ґрунтових умовах порівняно з PHB та PCL. У вологому ґрунті за 12 тижнів експозиції зразки PLA втратили лише $(17 \pm 3)\%$ маси. Візуально спостерігалось незначне помутніння та поява дрібних поверхневих тріщин по краях плівок. Згідно з даними FTIR-спектроскопії, відбулося збільшення інтенсивності смуги гідроксильних груп (3400 см^{-1}), що вказує на гідролітичні процеси. За умов помірної вологості втрата маси PLA за 12 тижнів була мінімальною – в межах $(3 \pm 1)\%$, що практично відповідає похибці вимірювання. Це підтверджує, що для ефективної біодеградації PLA в ґрунті необхідні або триваліший час, або специфічні умови, наприклад, термофільні, як у промисловому компостуванні, або наявність активніших штамів мікроорганізмів.

Суміш PLA/PBAT (комерційна біорозкладна плівка) показала кращі результати деградації, ніж чистий PLA, але поступалася PHB та PCL. У вологому ґрунті через 12 тижнів втрата маси зразків PLA/PBAT становила $(38 \pm 4)\%$. Плівки стали більш крихкими, з'явилися видимі ознаки розшарування та фрагментації. Присутність PBAT, який є більш схильним до гідролізу та мікробної атаки, очевидно, сприяла прискоренню деградації усієї композиції. В умовах помірної вологості втрата маси PLA/PBAT за 12 тижнів склала $(15 \pm 2)\%$.

Поліетилен (PE) та поліетилентерефталат (PET), як і очікувалося, продемонстрували надзвичайно високу стійкість до біодеградації в досліджуваних ґрунтових умовах. Протягом 12 тижнів експозиції в обох

варіантах вологості втрата маси для зразків PE та PET не перевищувала ($0,5 \pm 0,2$)%, що знаходиться в межах похибки експерименту. Візуально зразки не зазнали жодних змін, окрім незначного поверхневого забруднення частинками ґрунту. SEM-аналіз не виявив ознак ерозії чи мікробної атаки на поверхні цих полімерів. FTIR-спектри також залишилися практично незмінними. Ці результати підтверджують високу інертність традиційних пластиків до біорозкладання в ґрунті за відсутності попередньої абіотичної деструкції (наприклад, фотоокиснення).

Узагальнені дані щодо втрати маси полімерних зразків у ґрунтових умовах представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Втрата маси (%) полімерних зразків у ґрунті за 12 тижнів експозиції

Полімер	Вологість висока	Вологість помірна
PHB	97 ± 2	35 ± 4
PCL	81 ± 6	22 ± 3
PLA	17 ± 3	3 ± 1
PLA/PBAT	38 ± 4	15 ± 2
PE	< 1	< 1
PET	< 1	< 1

Експеримент у ґрунтових умовах чітко продемонстрував значні відмінності у швидкості біодеградації досліджуваних полімерів. Природний полімер PHB та синтетичний біорозкладний поліестер PCL показали високу здатність до розкладання, особливо за умов достатньої вологості. PLA та його суміші з PBAT деградували повільніше, підтверджуючи їхню потребу в більш специфічних умовах для ефективного розпаду. Традиційні пластики PE та PET виявилися практично не схильними до біодеградації протягом періоду дослідження.

Вологість ґрунту є критичним фактором, що суттєво впливає на активність мікроорганізмів та, відповідно, на швидкість розкладання біополімерів.

3.2. Результати деградації полімерів у водному середовищі

Дослідження біодеградації полімерів у водному середовищі проводилося згідно з методикою, описаною в підрозділі 2.3.2, протягом 12 тижнів при температурі 25 °С. Оцінювали деградацію зразків PHB, PCL, PLA, PLA/PBAT, PE та PET у двох варіантах: контрольному (вода з природним мікробним інокулятом, без доданих ферментів) та експериментальному (стерильний буферний розчин з додаванням ферменту ліпази *Aspergillus oryzae*).

3.2.1. Деградація у контрольних зразках (вода без ферменту)

У контрольних зразках, де деградація відбувалася під дією природної мікрофлори води, швидкість розкладання полімерів була значно нижчою, ніж у ґрунтових умовах.

PHB показав найпомітнішу деградацію серед усіх полімерів у контрольному водному середовищі. Через 8 тижнів експозиції втрата маси становила $(6 \pm 1)\%$, а до 12-го тижня досягла $(14 \pm 2)\%$. Зразки PHB стали каламутними та більш крихкими, що свідчить про повільний гідроліз та мікробну активність. Це узгоджується з відомостями про здатність деяких водних бактерій використовувати PHB як джерело вуглецю.

PCL у контрольному водному середовищі протягом перших 8 тижнів практично не змінював масу (втрата $< 1\%$). Однак, на 10–12 тижні на поверхні зразків PCL спостерігався розвиток нитчастих грибів (ймовірно, *Penicillium* sp. або *Cladosporium* sp.), що призвело до появи поодиноких ерозійних ямок та незначної втрати маси, яка до кінця 12-го тижня склала $(2,5 \pm 0,5)\%$.

PLA та суміш PLA/PBAT виявили дуже низьку швидкість деградації у воді без ферментів. Втрата маси для PLA за 12 тижнів не перевищувала $(1 \pm 0,3)\%$, для PLA/PBAT – $(1,5 \pm 0,4)\%$. На поверхні PLA-плівок утворився ледь помітний біоналіт, але суттєвих змін структури чи маси не відбулося. Це підтверджує, що

PLA є досить стійким у прісній воді за мезофільних умов без специфічних деструкторів.

PE та PET у контрольному водному середовищі не показали жодних ознак деградації протягом усього 12-тижневого періоду експерименту. Втрата маси була в межах похибки вимірювання ($< 0,2\%$), візуальних змін чи змін у FTIR-спектрах не зафіксовано.

3.2.2. Деградація за участю ферменту ліпази

Введення ферменту ліпази *Aspergillus oryzae* до водного середовища суттєво змінило картину деградації для поліестерів, що містять естерні зв'язки, доступні для атаки даним ферментом.

PCL продемонстрував найшвидшу та найповнішу деградацію за участю ліпази. Вже через 2 тижні інкубації зразки PCL стали липкими та почали втрачати форму. Через 4 тижні втрата маси PCL склала $(53 \pm 5)\%$, а через 8 тижнів – $(88 \pm 4)\%$. До 12-го тижня від зразків PCL залишилися лише дрібні крихкі фрагменти, що відповідало втраті маси понад $(95 \pm 2)\%$. Це свідчить про високу ефективність ліпази *A. oryzae* щодо гідролізу PCL.

PLA також значно прискорив свою деградацію в присутності ліпази. Поверхня PLA-плівок стала матовою, з'явилися мікротріщини вже на 2-му тижні. Через 4 тижні втрата маси PLA становила $(11 \pm 2)\%$, а до 8-го тижня – $(27 \pm 3)\%$. До кінця 12-тижневого експерименту зразки PLA втратили $(39 \pm 4)\%$ своєї початкової маси. У середовищі спостерігалось зниження pH з 7,2 до приблизно 6,3, що, ймовірно, пов'язано з накопиченням молочної кислоти – продукту гідролізу PLA. Хоча деградація PLA була не такою повною, як PCL, вплив ліпази був очевидним порівняно з контрольними зразками.

Суміш PLA/PBAT у присутності ліпази також показала прискорену деградацію. Втрата маси за 12 тижнів становила $(45 \pm 5)\%$, що було дещо вище, ніж для чистого PLA. Це може бути пов'язано з тим, що компонент PBAT також піддається дії ліпази, сприяючи загальному розпаду матеріалу.

PHB у розчині ліпази показав дещо прискорену деградацію порівняно з контролем: за 8 тижнів втрата маси склала $(19 \pm 2)\%$, а за 12 тижнів – $(28 \pm 3)\%$.

Хоча ліпаза *A. oryzae* не є специфічним ферментом для PHB (для якого потрібні PHB-деполімерази), вона могла частково гідролізувати естерні зв'язки в PHB або діяти на домішки (наприклад, олігомери або кополімерні ланки PHBV, якщо такі були присутні у зразку).

PE та PET не продемонстрували жодних ознак деградації в присутності ліпази. Їхня маса, зовнішній вигляд та FTIR-спектри залишилися незмінними протягом 12 тижнів. Це підтверджує, що ліпаза *A. oryzae* не здатна руйнувати вуглець-вуглецеві зв'язки поліетилену або висококристалічну ароматичну структуру PET. Дуже незначна втрата маси PET (близько 0,5%) була в межах похибки.

Результати деградації у водному середовищі з ліпазою чітко показують, що ферментативний гідроліз може значно прискорити розклад поліестерів, таких як PCL та PLA, навіть за умов, де природна мікробна активність є низькою.

Узагальнені дані щодо втрати маси полімерних зразків у водному середовищі представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Втрата маси (%) полімерних зразків у водному середовищі за 12 тижнів експозиції

Полімер	Вода (контроль)	Вода + Ліпаза
PHB	14 ± 2	28 ± 3
PCL	$2,5 \pm 0,5$	$> 95 \pm 2$
PLA	$1 \pm 0,3$	39 ± 4
PLA/PBAT	$1,5 \pm 0,4$	45 ± 5
PE	$< 0,2$	$< 0,2$
PET	$< 0,2$	$0,5 \pm 0,2$

Ці результати підкреслюють потенціал використання ферментів для керованої деградації полімерних відходів, особливо поліестерів.

3.3. Порівняльний аналіз швидкості деградації природних та синтетичних полімерів

Аналіз отриманих результатів дозволяє провести порівняльну оцінку швидкості та ефективності біодеградації досліджених полімерів, які належать до різних класів: природний біополімер (PHB), синтетичні біорозкладні поліестери (PCL, PLA, PLA/PBAT) та традиційні синтетичні полімери (PE, PET).

У ґрунті за умов високої вологості найшвидше деградував PHB (97% за 12 тижнів), що підтверджує його високу біодоступність для ґрунтової мікрофлори. PCL (81% за 12 тижнів) також показав високу швидкість розкладання, поступаючись лише PHB. Суміш PLA/PBAT (38% за 12 тижнів) деградувала помірно, тоді як чистий PLA (17% за 12 тижнів) виявився значно стійкішим у мезофільних умовах.

PE та PET (<1% за 12 тижнів) практично не розкладалися.

Порядок швидкості деградації у вологому ґрунті:

PHB > PCL > PLA/PBAT > PLA >> PE, PET.

Зменшення вологості ґрунту суттєво сповільнювало деградацію всіх біорозкладних полімерів, але відносний порядок їх стійкості зберігався. Це вказує на те, що для ефективного природного розкладання необхідна достатня кількість води, яка забезпечує як життєдіяльність мікроорганізмів, так і перебіг гідролітичних реакцій.

У воді без доданих ферментів швидкість деградації всіх полімерів була значно нижчою. PHB (14% за 12 тижнів) знову виявився найбільш схильним до розкладання, хоча й значно повільніше, ніж у ґрунті. PCL (2,5%) та PLA (1%), PLA/PBAT (1,5%) показали мінімальну деградацію. PE та PET (<0,2%) залишалися інертними.

Порядок швидкості деградації у воді (контроль):

PHB >> PCL $\approx$ PLA/PBAT $\approx$ PLA >> PE, PET.

Низька швидкість у воді пояснюється меншою концентрацією та різноманітністю мікроорганізмів порівняно з ґрунтом, а також можливим дефіцитом поживних речовин для їхнього розвитку.

Додавання ліпази кардинально змінило картину для поліестерів. PCL (>95% за 12 тижнів) розклався майже повністю, демонструючи найвищу чутливість до цього ферменту. PLA/PBAT (45%) та PLA (39%) також значно прискорили свою деградацію. PHB (28%) показав помірне прискорення. PE та PET залишилися стійкими.

Порядок швидкості деградації у воді з ліпазою:

$PCL \gg PLA/PBAT \approx PLA > PHB \gg PE, PET$.

Цікаво, що в присутності ліпази PCL деградував швидше за PHB, тоді як у природних середовищах (грунт, вода-контроль) PHB був лідером. Це свідчить про специфічність дії ферменту: ліпаза *A. oryzae* виявилася надзвичайно ефективною для PCL та менш – для PLA та PHB.

Природний полімер PHB показав найвищу швидкість розкладання в природних умовах (грунт, вода-контроль), що пов'язано з наявністю у природі мікроорганізмів, адаптованих до його метаболізму (продуцентів PHB-деполімераз). Синтетичні біорозкладні поліестери PCL, PLA та PLA/PBAT також здатні до біодеградації, але їх швидкість залежить від умов та наявності специфічних гідролаз. PCL загалом деградує швидше за PLA в мезофільних умовах, що узгоджується з літературними даними [12, 19]. PLA вимагає більш специфічних умов (підвищена температура, активні штами) або ферментативної допомоги для ефективного розкладу.

Контраст між біорозкладними полімерами (PHB, PCL, PLA, PLA/PBAT) та традиційними синтетичними полімерами (PE, PET) є разючим. В усіх досліджених умовах PE та PET продемонстрували практично повну відсутність біодеградації протягом 12 тижнів. Це підкреслює їхню довготривалу персистентність у навколишньому середовищі та пов'язані з цим екологічні проблеми. Навіть найповільніше деградуючий з біорозкладних полімерів (PLA у воді-контролі) все ж показав певні ознаки взаємодії з мікробним середовищем, на відміну від PE та PET.

Результати чітко демонструють, що середовище є вирішальним фактором. Грунт, багатий на різноманітну мікрофлору та органічні речовини, забезпечує

значно інтенсивнішу біодеградацію, ніж водне середовище з обмеженою кількістю мікроорганізмів. Додавання специфічних ферментів, таких як ліпаза, може кардинально прискорити розклад поліестерів навіть у водному середовищі, що відкриває перспективи для біотехнологічних підходів до утилізації пластикових відходів.

Вплив хімічної структури полімеру очевидний: полімери з легкодоступними для гідролізу естерними зв'язками (PHB, PCL, PLA) розкладаються, тоді як полімери з міцним вуглець-вуглецевим скелетом (PE) або стерично утрудненими ароматичними естерними групами (PET) залишаються стійкими. Кристалічність також відіграє роль: більш аморфні ділянки полімерів зазвичай деградують швидше. Порівняльний аналіз підтверджує наукову новизну роботи, зазначену у вступі, а саме – отримання кількісних даних щодо швидкості біодеградації конкретних зразків полімерів в ідентичних модельованих умовах та оцінку впливу ферменту ліпази. Ці дані є важливими для розуміння поведінки різних типів пластиків у довкіллі та обґрунтування стратегій поводження з ними.

3.4. Обговорення отриманих результатів та екологічна оцінка процесів

Отримані в ході дослідження результати дозволяють зробити низку висновків щодо закономірностей біодеградації полімерних матеріалів та провести їх екологічну оцінку. Продемонстровано, що здатність полімерів до біологічного розкладання суттєво варіює залежно від їхньої хімічної природи, фізичної структури та умов навколишнього середовища.

Дослідження підтвердило, що полімери, класифіковані як біорозкладні (PHB, PCL, PLA, PLA/PBAT), дійсно піддаються деструкції під дією мікроорганізмів, на відміну від традиційних PE та PET, які залишалися інертними. Однак, швидкість та повнота цього розкладання значно відрізняються.

PHB, як природний бактеріальний поліестер, показав найвищу швидкість біодеградації в ґрунті за сприятливих умов вологості, що узгоджується з даними

літератури про його швидкий метаболізм ґрунтовою мікрофлорою [30; 42]. Його здатність до розкладання навіть у водному середовищі (хоч і повільніше) робить його перспективним матеріалом для виробів, що можуть потрапляти у природні екосистеми.

PCL також продемонстрував добру біорозкладність, особливо в присутності ліпази, що відповідає його відомій чутливості до гідролітичних ферментів [15, 43]. Його відносно швидка деградація у вологому ґрунті та висока ефективність ферментативного розщеплення вказують на можливість його застосування у виробках, для яких бажаний контрольований розпад.

PLA, хоча й позиціонується як біорозкладний, у проведених мезофільних умовах ґрунту та води (без ферментів) розкладався повільно. Це підтверджує відомі обмеження PLA: для його ефективної деградації зазвичай потрібні умови промислового компостування (температура $>55-58\text{ }^{\circ}\text{C}$) [16; 33; 47]. Отримані результати свідчать, що потрапляння PLA у звичайний ґрунт або прохолодну воду може призвести до його тривалого збереження, потенційно з утворенням мікропластику на проміжних стадіях. Прискорення його деградації ліпазою вказує на шляхи вирішення цієї проблеми, наприклад, шляхом створення композитів з ферментами або використання спеціалізованих мікробних культур [52].

Суміш PLA/PBAT показала проміжну швидкість деградації, кращу, ніж чистий PLA, що пояснюється вищою біорозкладністю компонента PBAT та його позитивним впливом на загальну деструкцію композиту [50].

Результати однозначно підкреслюють вирішальний вплив умов середовища на біодеградацію.

– Вологість: Для ґрунтових умов вологість виявилася критичним фактором. У сухому ґрунті активність мікроорганізмів значно знижується, що призводить до різкого сповільнення розкладання навіть таких біоактивних полімерів, як PHB.

– Тип середовища (ґрунт vs. вода): Ґрунт, як правило, забезпечує інтенсивнішу біодеградацію завдяки вищій щільності та різноманітності мікробних популяцій, наявності поживних речовин та кращому контакту

мікроорганізмів з полімером. У водному середовищі, особливо з низьким вмістом органіки, біодеградація без зовнішнього втручання (ферментів) відбувається повільно.

– Наявність специфічних ферментів: Експеримент з ліпазою наочно продемонстрував, що наявність специфічних гідролітичних ферментів може багаторазово прискорити розклад поліестерів. Це вказує на важливість не лише загальної мікробної активності, але й присутності мікроорганізмів, здатних продукувати відповідні ензими, або на можливість штучного введення таких ферментів.

З екологічної точки зору, отримані результати мають важливі наслідки для поводження з полімерними відходами.

1. Переваги біорозкладних полімерів: PНВ та PCL показали себе як матеріали, здатні до відносно швидкого розкладання в модельованих природних умовах (особливо PНВ у ґрунті). Це зменшує їхній потенційний негативний вплив на довкілля у разі потрапляння туди як сміття, порівняно з традиційними пластиками. Їх використання може бути доцільним для виробів з коротким терміном служби, які важко зібрати для переробки (наприклад, деякі види упаковки, сільськогосподарські плівки).

2. Обмеження та ризики: Повільна деградація PLA в умовах, відмінних від промислового компостування, є суттєвим обмеженням. Якщо вироби з PLA потрапляють у звичайне сміття, ґрунт або воду, вони можуть зберігатися там тривалий час, сприяючи пластиковому забрудненню. Це підкреслює необхідність правильного маркування та інформування споживачів про умови, необхідні для розкладання таких матеріалів, а також розвитку відповідної інфраструктури для їх збору та компостування. Ризик "зеленого камуфляжу" (greenwashing) є актуальним, якщо біорозкладність перебільшується або умови її досягнення не уточнюються.

3. Проблема персистентних пластиків: Підтверджена стійкість PE та PET вкотре наголошує на гостроті проблеми забруднення довкілля цими матеріалами [8, 10]. Оскільки біодеградація для них є надзвичайно повільним

процесом (десятки, сотні років), основними стратегіями поводження з ними залишаються максимальне скорочення споживання, повторне використання та механічна/хімічна переробка. Пошук ефективних біотехнологічних методів їх деструкції (наприклад, за допомогою спеціалізованих ферментів типу PET-аз [13; 15; 57] або мікроорганізмів, виявлених у природі [53]) є актуальним напрямком досліджень, але поки що не має широкого практичного застосування в природних умовах.

4. Управління відходами: Результати дослідження можуть бути використані для розробки науково обґрунтованих підходів до управління полімерними відходами. Наприклад, для PHB та PCL можливе захоронення в ґрунті або компостування, тоді як для PLA перевагу слід віддавати промислового компостуванню. Для PE та PET необхідні роздільний збір та переробка.

5. Екологічна безпека: Важливо, щоб продукти біодеградації не були токсичними. Хоча в даній роботі детальний аналіз проміжних продуктів не проводився, відомо, що кінцевими продуктами повної мінералізації досліджених біополімерів є CO₂, вода та біомаса [23]. Однак, на проміжних етапах можуть утворюватися олігомери та мономери (наприклад, молочна кислота з PLA), які, хоч і є природними сполуками, у високих концентраціях можуть локально впливати на рН середовища, як це спостерігалось для PLA у воді з ліпазою.

Проведене порівняльне дослідження швидкості біодеградації різних полімерів в однакових модельованих умовах дозволило отримати цінні дані для прямого зіставлення їхньої екологічної поведінки. Кількісна оцінка впливу ферменту ліпази *Aspergillus oryzae* на деградацію поліестерів у водному середовищі підтвердила її високу ефективність для PCL та помірну – для PLA, що узгоджується з даними про субстратну специфічність ліпаз [44]. Загальні тенденції щодо швидкості розкладання PHB, PCL, PLA, PE та PET відповідають численним літературним джерелам [12; 18; 30; 36; 47].

Варто зазначити, що лабораторні умови не повністю відтворюють складність природних екосистем. Вплив таких факторів, як УФ-випромінювання (яке може ініціювати фотодеструкцію та полегшувати подальшу біодеградацію),

коливання температур, наявність різноманітних мікробних консорціумів та їх взаємодія, може бути значним. Тривалість експерименту (12 тижнів) є достатньою для оцінки відносно швидко розкладних матеріалів, але для повільно деградуючих полімерів можуть знадобитися довші періоди спостереження.

Перспективними напрямками подальших досліджень є:

- Вивчення біодеградації в ширшому діапазоні природних умов (різні типи ґрунтів, морська вода, анаеробні умови).
- Ідентифікація та використання специфічних мікроорганізмів-деструкторів або їхніх ферментних комплексів для прискорення розкладання стійких полімерів, включаючи PE та PET.
- Дослідження утворення мікропластику на проміжних стадіях біодеградації та його екологічних наслідків.
- Розробка нових біорозкладних полімерних матеріалів з покращеними властивостями та контрольованою швидкістю розпаду.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження екологічної оцінки деградації полімерів під дією мікроорганізмів у модельованих ґрунтово-водних умовах було виконано всі поставлені завдання та досягнуто мети роботи. Отримані дані дозволяють сформулювати наступні висновки та рекомендації.

Проведений аналіз наукової літератури підтвердив актуальність проблеми забруднення довкілля полімерними відходами та зростаючий інтерес до біодеградації як одного з перспективних шляхів її вирішення. Виявлено, що полімери класифікуються за походженням, структурою та здатністю до розкладання, причому традиційні синтетичні пластики, такі як поліетилен (PE) та поліетилентерефталат (PET), характеризуються надзвичайною стійкістю, тоді як біополімери, наприклад, полігідроксibuтират (PHB), та деякі синтетичні біорозкладні поліестери (полілактид (PLA), полікапролактон (PCL)) мають потенціал до біологічного розпаду. Деградація полімерів у природі є складним процесом, що включає абіотичні (фото-, термо-, гідролітична деструкція) та біотичні (дія мікроорганізмів – бактерій та грибів, та їхніх ферментів) механізми. Швидкість та ефективність біодеградації залежать від численних факторів, серед яких ключовими є хімічна структура полімеру (наявність гідролізованих зв'язків, кристалічність, молекулярна маса), властивості середовища (температура, вологість, рН, наявність кисню, УФ-випромінювання) та активність і склад мікробних угруповань.

Експериментальне дослідження швидкості деградації різних типів полімерів у модельованих умовах підтвердило значну варіабельність цього процесу. У ґрунтових умовах за 12 тижнів експозиції при температурі 28 ± 2 °C та високій вологості природний біополімер PHB продемонстрував найвищу швидкість розкладання, втративши $97 \pm 2\%$ маси. Це свідчить про його високу біодоступність для автохтонної ґрунтової мікрофлори. Синтетичний біорозкладний поліестер PCL також показав високу швидкість деградації, втративши $81 \pm 6\%$ маси. Комерційна біорозкладна суміш PLA/PBAT деградувала помірно ($38 \pm 4\%$ втрати маси), що було краще, ніж чистий PLA, який за тих

самих умов втратив лише $17 \pm 3\%$ маси. Це вказує на те, що PBAT, ймовірно, сприяє прискоренню розкладання композиції. Традиційні синтетичні полімери PE та PET, як і очікувалося, не виявили ознак біодеградації ($<1\%$ втрати маси), підтверджуючи свою високу персистентність у ґрунті.

Встановлено, що вологість ґрунту є критичним фактором, що впливає на швидкість біодеградації. За умов помірної вологості (40%) розкладання всіх біорозкладних полімерів суттєво сповільнювалося: PHB втратив $35 \pm 4\%$ маси, PCL – $22 \pm 3\%$, PLA/PBAT – $15 \pm 2\%$, а PLA – лише $3 \pm 1\%$ за 12 тижнів. Це підкреслює необхідність достатнього рівня вологості для забезпечення активної життєдіяльності мікроорганізмів-деструкторів та перебігу гідролітичних реакцій.

У водному середовищі без доданих ферментів (контроль) при температурі $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ швидкість деградації всіх досліджуваних полімерів була значно нижчою, ніж у ґрунті. PHB знову показав найкращий результат серед біорозкладних полімерів, втративши $14 \pm 2\%$ маси за 12 тижнів. Деградація PCL була мінімальною ($2,5 \pm 0,5\%$), причому розкладання активізувалося лише після 10-12 тижнів, ймовірно, через колонізацію грибами. PLA та суміш PLA/PBAT практично не деградували (втрата маси $<1,5\%$). PE та PET залишилися абсолютно інертними. Низька швидкість розкладання у воді, ймовірно, пов'язана з меншою концентрацією та різноманітністю мікроорганізмів, а також можливим дефіцитом поживних речовин порівняно з ґрунтовим середовищем.

Додавання ферменту ліпази *Aspergillus oryzae* до водного середовища кардинально змінило картину деградації для поліестерів. PCL продемонстрував найвищу чутливість до ліпази, розклавшись практично повністю (втрата маси $>95 \pm 2\%$) за 12 тижнів. Деградація PLA та суміші PLA/PBAT також значно прискорилося, з втратою маси $39 \pm 4\%$ та $45 \pm 5\%$ відповідно. PHB показав помірне прискорення розкладання ($28 \pm 3\%$ втрати маси). На PE та PET ліпаза не вплинула, що підтверджує її специфічність до естерних зв'язків та обмежену дію на висококристалічні ароматичні структури чи поліолефіни. Спостережуване зниження рН у середовищі з PLA свідчить про гідроліз з утворенням молочної

кислоти. Ці результати підкреслюють потенціал використання ферментів для керованої деградації полімерних відходів, особливо тих, що повільно розкладаються у природних умовах.

Порівняльний аналіз швидкості деградації різних типів полімерів чітко продемонстрував, що природний полімер PHB є найбільш схильним до біорозкладання у модельованих природних середовищах (грунт, вода-контроль). Синтетичні біорозкладні поліестери PCL та PLA/PBAT також здатні до деградації, але їх швидкість суттєво залежить від умов (особливо вологості та наявності специфічних гідролаз). PLA в мезофільних умовах без додаткових стимулів розкладається повільно, що вказує на необхідність створення специфічних умов (промислове компостування, використання активних штамів або ферментів) для його ефективної утилізації. Разючий контраст у швидкості деградації між біорозкладними полімерами та традиційними PE і PET підтверджує довготривалу екологічну загрозу, пов'язану з накопиченням останніх у довкіллі.

З екологічної точки зору, дослідження підкреслює переваги використання справді біорозкладних полімерів, таких як PHB та PCL, для виробів короткотривалого використання, особливо тих, що мають високий ризик потрапляння в довкілля. Водночас, виявлені обмеження щодо швидкості розкладання PLA в умовах, відмінних від промислового компостування, вказують на необхідність відповідального поводження з такими матеріалами, правильного маркування та розвитку інфраструктури для їх збору та переробки, щоб уникнути "зеленого камуфляжу" та тривалого забруднення. Підтверджена інертність PE та PET вкотре наголошує на пріоритетності скорочення їх споживання, повторного використання та розвитку ефективних технологій переробки й утилізації.

Результати дослідження мають практичне значення для розробки науково обґрунтованих підходів до управління полімерними відходами. Розуміння швидкості та механізмів деградації різних полімерів у конкретних умовах дозволяє оптимізувати процеси їх утилізації, зокрема, обирати відповідні методи компостування або біоремедіації забруднених територій. Оцінка впливу

ферментів відкриває перспективи для розробки біотехнологічних методів переробки полімерних відходів.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати наступні рекомендації:

1. Сприяти ширшому впровадженню та використанню природних біополімерів (наприклад, на основі PHA) та ефективно біорозкладних синтетичних полімерів (наприклад, PCL) для виробництва товарів короткотривалого використання, особливо в тих сферах, де збір та переробка ускладнені (агроплівка, деякі види упаковки харчових продуктів).

2. При використанні полімерів, що потребують специфічних умов для біодеградації (наприклад, PLA), забезпечити чітке маркування продукції із зазначенням рекомендованих способів утилізації (промислове компостування) та сприяти розвитку відповідної інфраструктури для їх збору та переробки.

3. Проводити інформаційно-просвітницьку роботу серед населення щодо правильного поводження з різними типами полімерних відходів, переваг та обмежень біорозкладних пластиків, а також важливості роздільного збору сміття.

4. Враховувати при екологічній оцінці та виборі полімерних матеріалів не лише їхню біорозкладність, але й увесь життєвий цикл, включаючи походження сировини, енерговитрати на виробництво, транспортування та утилізацію.

Проведена кваліфікаційна робота підтверджує складність проблеми полімерного забруднення та багатогранність підходів до її вирішення. Біодеградація є важливим інструментом у цьому комплексі заходів, але її ефективність значною мірою залежить від науково обґрунтованого підходу до вибору матеріалів, створення належних умов для їх розкладання та інтеграції з іншими стратегіями управління відходами. Подальші дослідження у цій галузі є критично важливими для досягнення сталого поводження з полімерними матеріалами та зменшення їхнього негативного впливу на навколишнє середовище.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Єфремова, О., Іванішина, Т., Ішук, Т., Трухіна, О., Єфремова, Ю. Сучасний стан поводження з полімерними відходами. Вісник Хмельницького національного університету, №5(313). 2022. С. 26–31.
2. Ливак Р. Нова економіка пластмас: потенціал, технології, стимули. Аналітична доповідь. Львів: LvivBioPlast, 2022. 72 с.
3. Центр громадського здоров'я МОЗ України. Шкода від пластикових пакетів для довкілля та здоров'я людей і як позбутися пакетної залежності. Сайт ЦГЗ, розділ «Новини». 03.02.2021. URL:
<https://www.phc.org.ua/news/shkoda-vid-plastikovikh-paketiv-dlya-dovkillya-ta-zd-orovya-lyudey-i-yak-pozbutisya-paketnoi>.
4. Через пандемію коронавірусу у 2020 році у світі зменшилося виробництво пластику. З початку ХХ століття це лише втретє. Громадське. 11.06.2021. URL: <https://hromadske.ua/posts/cherez-pandemiyu-koronavirusu-u-2020-roci-u-sviti-zm-enshilosya-virobnictvo-plastiku-z-pochatku-hh-stolittya-ce-lishe-vtretye>.
5. Шилова, Л. П., Бондаренко, В. Г. Біодеградація полімерних матеріалів у ґрунтових умовах. Науковий вісник екології, №3. 2019. 56–63.
6. Alexy P., Repiská M., Přikryl R., та ін. PLA/PHB-based materials fully biodegradable under both industrial and home-composting conditions. Polymers. 2022. Vol. 14, no. 19. P. 4113. DOI: 10.3390/polym14194113.
7. Andrady A.L., Barnes P.W., Bornman J.F. та ін. Oxidation and fragmentation of plastics in a changing environment: from UV-radiation to biological degradation. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 851, pt. 2. P. 158022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158022.
8. Asaduzzaman F., Salmon S. Controllable Water-Triggered Degradation of PCL Solution-Blown Nanofibrous Webs Made Possible by Lipase Enzyme Entrapment. Fibers, 2023, 11(6): 49. DOI: 10.3390/fib11060049.

9. Bejagam K.K., Banerjee S., Dumont J.H. та ін. Biodegradation Studies of Polyhydroxybutyrate and Polyhydroxybutyrate-co-Polyhydroxyvalerate Films in Soil. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(8): 7638. DOI: 10.3390/ijms24087638.
10. Bergeson A.R., Silvera A.J., Alper H.S. Bottlenecks in biobased approaches to plastic degradation. *Nature Communications*, 2024, 15: 4715. DOI: 10.1038/s41467-024-49146-8.
11. Bertocchini F. та ін. Wax worm saliva and the enzymes therein are the key to polyethylene degradation by *Galleria mellonella*. *Nature Communications*, 2022, 13: 5568. DOI: 10.1038/s41467-022-33127-w.
12. Bher A., Cho Y., Auras R. Boosting Degradation of Biodegradable Polymers. *Macromolecular Rapid Communications*, 2023, 44(5): e2200769. DOI: 10.1002/marc.202200769.
13. Borelbach P., Kopitzky R., Dähringer J., Gutmann P. Degradation Behavior of Biodegradable Man-Made Fibers in Natural Soil and in Compost. *Polymers*, 2023, 15(13): 2959. DOI: 10.3390/polym15132959.
14. Cai Z., Lu M., Zhang Z., Wei X., Hu Y., Li T., Gong H., Yan M. Biological degradation of plastics and microplastics: a recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. *Microorganisms*. 2023. Vol. 11, no. 7. P. 1661. DOI: 10.3390/microorganisms11071661.
15. Chamas A., Moon H., Zheng J. et al. Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020. Vol. 8, № 9. P. 3494–3511. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b06635.
16. Gong H., Yan M., Cai Z. et al. Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors. *Microorganisms*. 2023. Vonye A., Bhagwat P., Singh S., Pillai S. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 759. Art. 143536. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143536.

17. Gong H., Yan M. та ін. Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors.

Microorganisms, 2023, 11(7): 1661. DOI: 10.3390/microorganisms11071661.

18. Guicherd M., Ben Khaled M., Guérault M. та ін. An engineered enzyme embedded into PLA to make self-biodegradable plastic. *Nature*, 2024, 631(8022): 884–890. DOI: 10.1038/s41586-024-07709-1.

19. Hajilou N., Mostafayi S.S., Yarin A.L., Shokuhfar T. A Comparative Review on Biodegradation of Poly(Lactic Acid) in Soil, Compost, Water, and Wastewater

Environments: Incorporating Mathematical Modeling Perspectives. *AppliedChem*, 2025, 5(1): 1. DOI: 10.3390/appliedchem5010001.

20. Ibrahim S. S., Ionescu D., Grossart H.-P. Tapping into fungal potential: biodegradation of plastic and rubber by potent fungi. *Science of The Total Environment*. 2024. 934:173188. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173188.

21. Islam Z. F., Cherepanov P. V., Xu W. та ін. Native polymer degradation capacity of microorganisms in agricultural soils. *Science of The Total Environment*. 2025. 968:178915. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178915.

22. Kim J., Gupta N. S., Bezek L. B. та ін. Biodegradation studies of polyhydroxybutyrate and polyhydroxybutyrate-co-polyhydroxyvalerate films in soil. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. 24(8):7638. DOI: 10.3390/ijms24087638.

23. Li S., Xu S., Zhang L. та ін. Demonstrating the key role of *Bacillus* in poly lactic acid film degradation through statistical analysis and strain screening. *Environmental Pollution*. 2024. 363(Pt 2):125229. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.125229.

24. Li W., Zhao W., Zhu H., Li Z.-J., Wang W. State of the art in the photochemical degradation of (micro)plastics: from fundamental principles to catalysts and applications. *Journal of Materials Chemistry A*. 2023. Vol. 11, no. 6. P. 2503–2527. DOI: 10.1039/D2TA09523H.

25. Lors C., Leleux P., Park C.H. State of the art on biodegradability of bio-based plastics containing polylactic acid. *Frontiers in Materials*, 2024, 11: 1476484. DOI: 10.3389/fmats.2024.1476484.
26. Lv S., Li Y., Zhao S. та ін. Biodegradation of typical plastics: from microbial diversity to metabolic mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. 25(1):593. DOI: 10.3390/ijms25010593.
27. Maragkaki A., Malliaros N.G., Sampathianakis I., Lolos T., Tsompanidis C., Manios T. Evaluation of biodegradability of polylactic acid and compostable bags from food waste under industrial composting. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 22. P. 15963. DOI: 10.3390/su152215963.
28. Min K., Cuiffi J.D., Mathers R.T. Ranking environmental degradation trends of plastic marine debris based on physical properties and molecular structure. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. P. 727. DOI: 10.1038/s41467-020-14538-z.
29. Mohanan N., Montazer Z., Sharma P.K., Levin D.B. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. Art. 580709. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.
30. Niu Y., Pan F., Shen K. та ін. Status and Enhancement Techniques of Plastic Waste Degradation in the Environment: A Review. *Sustainability*, 2024, 16(21): 9395. DOI: 10.3390/su16219395.
31. OECD. Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short, says OECD. OECD Press Release. 22.02.2022. URL: <https://www.oecd.org/newsroom/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-wastemanagement-and-recycling-fall-short.htm>.
32. Payanthoth N.S., Nik Mut N.N., Samanta P., Li G., Jung J. A review of biodegradation and formation of biodegradable microplastics in soil and freshwater environments. *Applied Biological Chemistry*, 2024, 67: 110. DOI: 10.1186/s13765-024-00959-7.
33. Payanthoth N.S., Nik Mut N.N., Samanta P. et al. A review of biodegradation and formation of biodegradable microplastics in soil and freshwater environments.

Applied Biological Chemistry. 2024. Vol. 67. Art. 110.
DOI: 10.1186/s13765-024-00959-7.

34. Roberts C., Edwards S., Vague M. та ін. Environmental consortium containing *Pseudomonas* and *Bacillus* species synergistically degrades polyethylene terephthalate plastic. *mSphere*. 2020. 5(6):e01151-20. DOI: 10.1128/mSphere.01151-20.

35. Rosli N. A., Karamanlioglu M., Kargarzadeh H., Ahmad I. Comprehensive exploration of natural degradation of poly(lactic acid) blends in various degradation media: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. 187:732–741. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.07.196.

36. Ruggero F., Onderwater R.C.A., Carretti E., та ін. Degradation of film and rigid bioplastics during the thermophilic phase and the maturation phase of simulated composting. *Journal of Polymers and the Environment*. 2021. Vol. 29, no. 11. P. 3015–3028. DOI: 10.1007/s10924-021-02098-2.

37. Rüthi J., Cerri M., Brunner I. та ін. Discovery of plastic-degrading microbial strains isolated from the alpine and Arctic terrestrial plastisphere. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1178474. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1178474. ol. 11, № 7. P. 1661. DOI: 10.3390/microorganisms11071661.

38. Safdar A., Imran M., Javed A. та ін. Determination of biodegradation potential of *Aspergillus niger*, *Candida albicans*, and *Acremonium sclerotigenum* on polyethylene, polyethylene terephthalate, and polystyrene microplastics. *International Journal of Microbiology*. 2024. 2024:7682762. DOI: 10.1155/2024/7682762.

39. Samir A., Ashour F.H., Abdel Hakim A.A., Bassyouni M. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *npj Materials Degradation*, 2022, 6: 68. DOI: 10.1038/s41529-022-00277-7.

40. Satchanska G., Davidova S. Natural and Synthetic Polymers for Biomedical and Environmental Applications. *Polymers*. 2024. Vol. 16, № 8. P. 1159. DOI: 10.3390/polym16081159.

41. Sefidi Heris Y. Bacterial biodegradation of synthetic plastics: a review. Bulletin of the National Research Centre. 2024. 48:87. DOI: 10.1186/s42269-024-01241-y.
42. Silva R.R.A., Marques C.S., Arruda T.R., Teixeira S.C., de Oliveira T.V. Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. Macromol. 2023. Vol. 3, № 2. P. 371–399. DOI: 10.3390/macromol3020023.
43. Silva R.R.A., Marques C.S., Arruda T.R., Teixeira S.C., de Oliveira T.V. Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. Macromol, 2023, 3(2): 371–399. DOI: 10.3390/macromol3020023.
44. Spina F., Tummino M. L., Poli A. та ін. Low density polyethylene degradation by filamentous fungi. Environmental Pollution. 2021. 274:116548. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116548.
45. Sui B., Wang T., Fang J. та ін. Recent advances in the biodegradation of polyethylene terephthalate with cutinase-like enzymes. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1265139. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1265139.
46. Temporiti M.E.E., Nicola L., Nielsen E., Tosi S. Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. Microorganisms, 2022, 10(6): 1180. DOI: 10.3390/microorganisms10061180.
47. The Minderoo Foundation. Plastic Waste Makers Index 2023. Minderoo Foundation, 2023. 104 p.
48. United Nations Environment Programme (UNEP). Plastic planet: How tiny plastic particles are polluting our soil. UNEP News & Stories. 22.12.2021. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/plastic-planet-how-tiny-plastic-particles-are-polluting-our-soil>.
49. United Nations Environment Programme (UNEP). Plastic Pollution – Our World Is Drowning in Plastic. UNEP Official Website. 2021. URL: <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution/>.
50. Vital-Vilchis I., Karunakaran E. Using Insect Larvae and Their Microbiota for Plastic Degradation. Insects, 2025, 16(2): 165. DOI: 10.3390/insects16020165.

51. Vonye A., Bhagwat P., Singh S., Pillai S. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 759. Art. 143536. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143536.
52. Wu J., Wang J., Zeng Y. et al. Biodegradation: the best solution to the world problem of discarded polymers. *Bioresources and Bioprocessing*. 2024. Vol. 11, № 1. Art. 79. DOI: 10.1186/s40643-024-00793-1.
53. Wu J., Wang J., Zeng Y. та ін. Biodegradation: the best solution to the world problem of discarded polymers. *Bioresources and Bioprocessing*, 2024, 11: 79. DOI: 10.1186/s40643-024-00793-1.
54. Wu Z., Shi W., Valencak T.G., Zhang Y., Liu G., Ren D. Biodegradation of conventional plastics: candidate organisms and potential mechanisms. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 885. P. 163908. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.163908.
55. Xiang S., Yan H., Tian H. Degradation of Polymer Materials in the Environment and Its Impact on the Health of Experimental Animals: A Review. *Polymers*. 2024. Vol. 16, № 19. P. 2807. DOI: 10.3390/polym16192807.
56. Yang S., Brasseur G., Walters S., et al. Global atmospheric distribution of microplastics with evidence of low oceanic emissions. *npj Climate and Atmospheric Science*. 2025. Vol. 8. Art. 81. DOI: 10.1038/s41612-025-00914-3.
57. Yao X., Yang X., Lu Y., Qiu Y., Zeng Q. Review of the synthesis and degradation mechanisms of some biodegradable polymers in natural environments. *Polymers*. 2025. Vol. 17, no. 1. P. 66. DOI: 10.3390/polym17010066.
58. Zhang K., Hamidian A.H., Tubić A. et al. Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 274. Art. 116554. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116554.
59. Zhang X., Yin Z., Xiang S., Yan H., Tian H. Degradation of polymer materials in the environment and its impact on the health of experimental animals: a review. *Polymers*. 2024. Vol. 16, no. 19. P. 2807. DOI: 10.3390/polym16192807.

60. Ziani K., Barboiu M., Ciobica A., et al. Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review. *Nutrients*. 2023. Vol. 15, № 3. P. 617. DOI: 10.3390/nu15030617.
61. Zimmermann W. Polyester-degrading enzymes in a circular economy of plastics. *Nature Reviews Bioengineering*, 2025 (12 May 2025). DOI: 10.1038/s44222-025-00308-3.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1

Порівняльна характеристика основних типів полімерів, їх стійкості та основних механізмів деградації

Тип полімеру	Приклади	Походження	Здатність до біодеградації	Орієнтовний час розкладу в природі (залежно від умов)	Основні механізми деградації	Основні екологічні проблеми (для стійких)
Природні біополімери	Целюлоза, крохмаль, білки, натуральний каучук, РНВ	Біосинтез живими організмами, відновлювана сировина	Висока (за сприятливих умов)	Декілька тижнів – декілька років	Біодеградація (ферментативний гідроліз мікроорганізмами), гідроліз	Мінімальні, є частиною природного вуглецевого циклу
Синтетичні біорозкладні полімери	Полілактид (PLA), полікапролактон (PCL), поліестери на основі відновлюваної сировини	Частково або повністю з відновлюваної сировини, або нафтохімічна сировина (PCL)	Помірна до високої (сильно залежить від умов та структури)	Місяці – декілька років (в компості); значно довше в ґрунті/воді без спец. умов	Біодеградація, гідроліз (абіотичний та ферментативний), фотоокиснення (як початковий етап)	Накопичення у разі потрапляння в умови, не сприятливі для розкладу (напр., холодна вода для PLA)

Поліолефіни (традиційні)	Поліетилен (PE), Поліпропілен (PP)	Нафтохімічна сировина	Дуже низька (практично небіорозкладні)	Десятиліття – сотні років	Фотоокиснювальна а деградація (дуже повільна, призводить до фрагментації), термоокиснення	Накопичення, утворення мікропластик у, забруднення ґрунтів, водних екосистем, шкода біоті
Поліестери (традиційні , стійкі)	Поліетилентерефталат (PET)	Нафтохімічна сировина	Дуже низька (в типових природних умовах практично не розкладається)	Десятиліття – сотні років	Фотоокиснення (повільне), обмежений гідроліз; біодеградація можлива лише специфічними, нещодавно відкритими ферментами (PET- аза)	Накопичення, утворення мікропластик у, забруднення
Інші масові синтетичні полімери (стійкі)	Полістирол (PS), Полівінілхлорид (PVC)	Нафтохімічна сировина	Дуже низька	Десятиліття – сотні років (PVC – потенційно довше)	Фотоокиснення (дуже повільне для PS); для PVC – дегідрохлорування під дією УФ, тепла	Накопичення, крихкість (PS), виділення токсичних речовин при горінні (особливо PVC)

Додаток Б

Таблиця А.2

Характеристика досліджуваних полімерних зразків та основних умов експерименту з біодеградації

№ з/п	Об'єкт дослідження	Коротка характеристика (походження, ключові властивості з тексту)	Форма зразка для експерименту	Середовище експерименту	Ключові параметри середовища експерименту (Т, вологість/рН, особливості)	Очікувана/спостережувана в дослідженні швидкість/особливості біодеградації
1	Полілактид (PLA)	Біорозкладний поліестер з відновлюваної сировини; відносно крихкий; потребує >50°C для швидкого компостування [41, 47].	Плівки/пластинки (~2×2 см, 0.1-0.5 мм)	Ґрунт (мезофільний), Вода (з/без ліпази), Компост (модельний)	Т: ~25-30°C, ~40%/~100% вологість; Вода: 25°C, рН 7-7.5; Вода+Ліпаза: 25°C, рН 7.2 (потім ~6.5); Компост: 50-58°C	Повільна в ґрунті/воді без ферментів; Значно прискорена ліпазою (25% втрати маси/8 тижнів); Швидка в компості.

2	Полікапролактон (PCL)	Синтетичний біорозкладний поліестер; гнучкий; Тпл ~60°C; висока чутливість до ферментів [43, 44].	Пластинки (~2×2 см, 0.1-0.5 мм)	Ґрунт (мезофільний), Вода (з/без ліпази)	Г: ~25-30°C, ~40%/~100% вологість; Вода: 25°C, pH 7-7.5; Вода+Ліпаза : 25°C, pH 7.2	Помірна в ґрунті, дуже повільна у воді без ферментів; Дуже швидка з ліпазою (>85% втрати маси/8 тижнів).
3	Полігідроксibuтират (PHB) (та кополімери)	Природний біополіестер (PHA); висока кристалічність, крихкий (чистий PHB); висока біорозкладність [42, 49, 59].	Тонкі плівки (~2×2 см, 0.1-0.5 мм)	Ґрунт (мезофільний), Вода (з/без ліпази)	Г: ~25-30°C, ~40%/~100% вологість; Вода: 25°C, pH 7-7.5; Вода+Ліпаза : 25°C, pH 7.2	Дуже швидка у вологому ґрунті (>90% втрати маси/8-10 тижнів); Помірна у воді, частково прискорена ліпазою.
4	Суміш PLA/PBAT («Біо-плівка»)	Комерційна біорозкладна суміш; PBAT додає гнучкості та прискорює розклад PLA.	Плівки	Ґрунт (мезофільний), Вода (з/без ліпази)	Г: ~25-30°C, ~40%/~100% вологість; Вода: 25°C, pH 7-7.5; Вода+Ліпаза : 25°C, pH 7.2	Швидше за чистий PLA в ґрунті (30-40% втрати маси/12 тижнів); Прискорена ліпазою.

5	Поліетилен (PE)	Нафтохімічний поліолефін; висока стійкість; гідрофобний; практично небіорозкладний .	Фрагменти/гранули (HDPE)	Ґрунт (мезофільний), Вода (з/без ліпази)	Т: ~25-30°C, ~40%/~100% вологість; Вода: 25°C, pH 7-7.5; Вода+Ліпаза : 25°C, pH 7.2	Практично відсутня деградація в усіх досліджуваних умовах; Спостерігалось мікробне обростання без ерозії.
6	Поліетилентерефталат (PET)	Нафтохімічний поліестер; висока стійкість; ароматичні групи; повільний розклад навіть спец. ферментами [48, 57].	Тонкі пластинки/гранули	Ґрунт (мезофільний), Вода (з/без ліпази)	Т: ~25-30°C, ~40%/~100% вологість; Вода: 25°C, pH 7-7.5; Вода+Ліпаза : 25°C, pH 7.2 (використана ліпаза АО не є специфічною)	Практично відсутня деградація в усіх досліджуваних умовах; Ліпаза <i>Aspergillus oryzae</i> не ефективна.