

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів
Кафедра екології та біомоніторингу

**Метааналіз процесів біодеградації пластику
мікроорганізмами пластисфери**

Дипломна робота
Рівень вищої освіти - другий (магістерський)

Виконала: студентка 2 курсу, групи 203-М
спеціальності 101 – Екологія
Аліна КУШНЕРЕНКО

Керівник:
д. б. н., доц. Аліна ЖУК

Рецензент:

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № __

від „__” _____ 2025 р.

зав. кафедри _____ проф. Марія ФЕДОРЯК

Чернівці – 2025

АНОТАЦІЯ

Кушнеренко А. С. Метааналіз процесів біодеградації пластику мікроорганізмами пластисфери. *Кваліфікаційна робота другого (магістерського) рівня вищої освіти.* Спеціальність 101 Екологія. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. Чернівці, 2025.

У роботі проаналізовано сучасні наукові дані щодо біодеградації різних типів пластику мікроорганізмами пластисфери. На основі матеріалів, відібраних за протоколом PRISMA, узагальнено таксономічний склад пластисфери та визначено основні фактори, що впливають на ефективність деструкції полімерів. Особливу увагу приділено метааналізу біодеградації поліетилену та оцінці впливу попередньої обробки на швидкість процесу.

Ключові слова: синтетичні полімери, декомпозиція, мікробіом, бактерії, мікроміцети, аналіз вторинних даних.

ANNOTATION

Kushnerenko A. S. Meta-analysis of plastic biodegradation processes by plastisphere microorganisms. *Qualification work of the second (master's) level of higher education.* Specialty 101 Ecology. Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. Chernivtsi, 2025.

The work summarizes current scientific data on the biodegradation of various plastics by plastisphere microorganisms. Using studies selected according to the PRISMA protocol, the taxonomic structure of the plastisphere and key factors affecting polymer degradation efficiency were analyzed. Special attention was given to the meta-analysis of polyethylene biodegradation and the role of pretreatment methods in accelerating the process.

Keywords: synthetic polymers, material breakdown, microbial community,

bacteria, microfungi, secondary data analysis.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Аліна Кушнеренко

(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	4
1.1. Пластисфера як новий мікробний біотоп	4
1.2. Головні агенти біодеградації пластику	9
1.3. Метааналіз – сучасний аналітичний інструмент наукових досліджень	14
Розділ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	18
2.1. Матеріали, об’єкт та предмет дослідження.....	18
2.2. Методи дослідження	21
Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	24
3.1. Склад мікробіому пластисфери	24
3.2. Ефективність біодеградації пластику різних типів	28
3.3. Метааналіз ефективності біорозкладання LDPE/PE.....	37
ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	40
ДОДАТКИ.....	52

ВСТУП

Пластикове забруднення – одна з найгостріших екологічних проблем сучасності. Висока стійкість, низька вартість та універсальність пластику призвели до його повсюдного накопичення в навколишньому середовищі, від глибоководних морських западин до віддалених полярних регіонів. Наприклад, лише в Індії щорічно утворюється близько 9,4 мільйони тонн пластикових відходів, значна частина яких залишається незібраною (Joshi et al., 2025). Останні дослідження показують, що поверхня пластикових уламків стала новою екологічною нішею, відомою як «пластисфера», що слугує унікальним середовищем існування для мікробних угруповань (Amaral-Zettler et al., 2020). Вивчення екологічних особливостей пластисфери наразі **актуальне**, оскільки мікроорганізми у її складі набули пристосувань до біодеградації полімерів і можуть стати основою для розробки біотехнологічних рішень для подолання глобального пластикового забруднення (Buron-Moles et al., 2025; Joshi et al., 2025).

Метою дослідження було з'ясувати ефективність біодеградації пластику мікроорганізмами пластисфери на основі великого обсягу емпіричних даних, опублікованих у англomовних наукових журналах.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано **завдання**:

1. Дослідити публікаційну активність щодо біодеградації пластику мікроорганізмами у науковій базі ScienceDirect та підготувати дані для метааналізу з дотриманням міжнародного протоколу PRISMA.
2. Вилучити з релевантного пулу статей дані, придатні для порівняльного аналізу ефективності біодеградації пластику.
3. Дослідити таксономічний склад мікробіому пластисфери.
4. Проаналізувати фактори різного походження, які впливають на ефективність біодеградації пластику різного типу.
5. Здійснит мета-аналіз ефективності біодеградації поліетилену як найбільш розповсюдженого типу пластику.

Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Пластисфера як новий мікробний біотоп

Стрімке накопичення пластикових відходів у Світовому океані та прісноводних системах, особливо у вигляді мікропластику, створило абсолютно новий тип середовища для життєдіяльності мікроорганізмів. Це явище, яке отримало назву пластисфера, стало об'єктом пильної уваги екологічної мікробіології (Zettler et al., 2013; Amaral-Zettler et al., 2020).

Уперше термін «пластисфера» був офіційно запропонований у 2013 році Трейсі Л. Зеттлер та Ерікою Амарал-Зеттлер (Zettler et al., 2013). Це трапилося в процесі аналізу фрагментів пластику, зібраних під час експедиції у Північно-Атлантичному субтропічному коловороті. Вчені з'ясували, що поверхня пластикових уламків не стерильна, а густо населена і функціонує як твердий мікробний острів у товщі води (Zettler et al., 2023). Результати сканувальної електронної мікроскопії та секвенування нового покоління виявили різноманітне угруповання гетеротрофів, автотрофів, хижаків та симбіонтів. Таким чином, пластисфера була визначена як сукупність мікробних угруповань, що прикріплюються та розвиваються на поверхні пластикових субстратів у водному середовищі (Amaral-Zettler et al., 2020).

Ця концепція докорінно змінила розуміння екологічної ролі пластикового забруднення. Пластик перейшов з категорії інертного фізичного забруднювача до категорії нового антропогенного біотопу, який слугує вектором для мікробної екології та біогеохімічних процесів. Пластиковий субстрат, незважаючи на свою штучність, достатньо стабільний та довговічний, щоби забезпечити формування складних, зрілих мікроекосистем, які мають унікальний видовий склад і функціональні властивості, відмінні від навколишнього середовища (Amaral-Zettler et al., 2020; Kirstein et al., 2016).

Формування мікробних угруповань на поверхні пластику – класичний, але прискорений процес утворення біоплівки, який включає кілька послідовних та взаємопов'язаних стадій (Shi et al., 2023), наведених на рисунку 1.1.

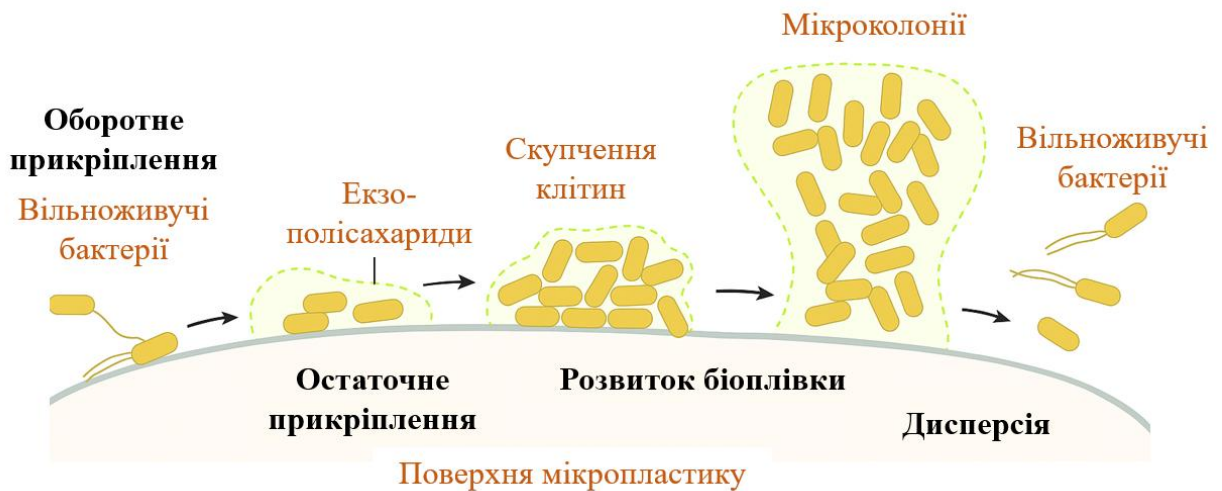


Рис. 1.1. Стадії утворення пластисфери (Shi et al., 2023)

Спочатку відбувається процес, відомий як *початкове кондиціонування*. Поверхня пластику, яка зазвичай характеризується гідрофобністю, потрапляючи у водне середовище, швидко притягує та утримує розчинені органічні й неорганічні молекули, зокрема білки та полісахариди. Сформований й такий спосіб кондиціонуючий шар змінює електричний заряд поверхні та її здатність відштовхувати воду, створюючи ідеальні умови для прикріплення перших мікроорганізмів (Rummel et al., 2021).

Наступним кроком є *піонерна колонізація*. На кондиціонуючий шар починають прикріплюватися перші мікроорганізми, переважно рухливі бактерії (рис. 1.1). Вони використовують поживні речовини з цього шару та починають виробляти позаклітинний полімерний матрикс (Shi et al., 2023). Розвиток біоплівки зменшує поверхневу гідрофобність пластикових залишків

Потім відбувається *дозрівання біоплівки та формування мікробного консорціуму*. Позаклітинний полімерний матрикс, що складається переважно з екзополісахаридів, білків та нуклеїнових кислот, утворює складну тривимірну структуру. Розвиток біоплівки зменшує поверхневу гідрофобність пластикових залишків. Це середовище сприяє швидкому розмноженню мікроорганізмів та залученню нових видів, включаючи вторинних колонізаторів і навіть хижаків, до яких належать найпростіші (Mulky et al., 2025). Внутрішня частина біоплівки стає особливою мікроезоною, де

виникають специфічні градієнти кисню, рівня кислотності та концентрації поживних речовин. Це, своєю чергою, сприяє розвитку складних трофічних взаємодій та спеціалізації функцій між організмами. На поверхні пластику можуть формуватися бактеріальні, грибкові, та мікроводорослеві біоплівки. Встановлено, що мікробіологічний склад пластисфери суттєво відрізняється від угруповань мікроорганізмів, що вільно плавають у воді. На структуру та різноманітність мікробних спільнот, що колонізують пластик, впливають географія, сезонність, хімічний склад субстрату, час експозиції, фізико-хімічні властивості пластику та наявність поживних речовин у середовищі (Goudriaan et al., 2025; Zettler et al., 2013).

Пластисфера являє собою унікальну екологічну нішу, оскільки вона поєднує фактори, нетипові для природних водних біотопів, та піддає мікроорганізми селективному тиску, відмінному від наявного у природному середовищі. Унікальність мікробних угруповань, що розвивається на пластику, зумовлена низкою чинників. По-перше, це стабільність субстрату у водному середовищі. На відміну від органічних матеріалів, які швидко розкладаються або тонуть, пластик хімічно стійкий і може дрейфувати у воді протягом дуже довгого часу, забезпечуючи постійну, хоча й рухливу, платформу для існування біоплівки. По-друге, відбувається хімічна стимуляція. Сам полімер, а також численні хімічні домішки, що використовуються у виробництві пластику (наприклад, пластифікатори, антиоксиданти та пігменти), стають джерелами вуглецю для мікроорганізмів (Merchant et al., 2024). Це призводить до природного добору тих мікробів, які здатні засвоювати синтетичні сполуки, включаючи так звані мікроби-руйнівники (Alshammari et al., 2025).

Поверхня пластику, яка відштовхує воду, активно притягує та утримує гідрофобні органічні токсичні речовини з води, наприклад, поліциклічні ароматичні вуглеводні та поліхлоровані біфеніли (Kirstein et al., 2016). Таким чином, пластик виступає як переносник, що концентрує хімічне забруднення. Це створює мікросередовище з аномально високою концентрацією

забруднювачів, що стимулює розвиток тих мікроорганізмів, які мають специфічні механізми стійкості до цих токсичних речовин або здатні їх розкласти.

У цій унікальній мікроекосистемі відбуваються важливі екологічні та біогеохімічні процеси. Найважливіша функція пластисфери – біодеградація або біотрансформація пластику як ксенобіотика. Мікроорганізми, які колонізують пластик, синтезують спеціалізовані екзоферменти ліпази, естерази, кутинази, оксидази (Jasquin et al., 2019). Ці ферменти здатні каталізувати окислення та гідроліз полімерних ланцюгів, перетворюючи високомолекулярний пластик спочатку на олігомери, а потім на низькомолекулярні сполуки, які можуть бути асимільовані клітинами як джерело вуглецю та енергії.

Мікроорганізми пластисфери взаємодіють з адсорбованими забруднювачами. Вони можуть накопичувати токсиканти у своїх клітинах або ж біотрансформувати їх, змінюючи токсичність та біодоступність для наступних ланок харчового ланцюга.

Біоплівка – ідеальне середовище для горизонтального переносу генів через надзвичайно високу щільність клітин і значний контакт між різними видами мікроорганізмів. Ці обставини, посилені стресом від забруднюючих речовин, створюють умови для інтенсивного обміну генетичним матеріалом (Jia et al., 2024). Завдяки цьому обміну поширюються не лише гени, які відповідають за вироблення ферментів для розкладання пластику та стійкості до токсичних речовин, але й гени стійкості до антибіотиків. Таким чином, мікробне угруповання на пластику розглядається як екологічно «гаряча точка» для швидкої еволюції мікробних функцій і поширення стійкості до медичних препаратів.

Отже, існування пластисфери має як потенційно позитивні, так і значні негативні наслідки, які впливають на біогеохімічні цикли та здоров'я екосистем.

Найбільш значущий позитивний аспект діяльності мікроорганізмів, що мешкають на пластику полягає у їхньому внеску в самоочищенні навколишнього середовища (Danso et al., 2019; Pinnell, Turner, 2019). Вони ініціюють біологічне руйнування пластику. Хоча повне перетворення полімерів на прості неорганічні речовини у природних умовах відбувається повільно, цей процес все ж дозволяє включити штучний вуглець у природний кругообіг речовин, запобігаючи його нескінченному накопиченню. Крім того, спеціалізовані мікроби, що знаходяться на пластику, можуть здійснювати успішну біологічну трансформацію або руйнування адсорбованих токсичних речовин, наприклад, поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Це сприяє детоксикації мікросередовища, яке формується навколо пластикового сміття.

З іншого боку, існує низка серйозних негативних наслідків. Пластикові уламки виступають як вектор для поширення хвороботворних організмів (Zettler et al., 2013). Вони є ідеальним субстратом для біологічного обростання та перенесення небезпечних мікроорганізмів. Наприклад, на пластику часто виявляють представників роду *Vibrio*, багато з яких є небезпечними для людини та морських тварин. Зокрема, збудник холери, *Vibrio cholerae*. Пластик, дрейфуючи на великі відстані, сприяє глобальному розповсюдженню цих загроз.

Крім того, оскільки мікробне угруповання на пластику є «гарячою точкою» для інтенсивного горизонтального переносу генетичного матеріалу, вона активно поширює гени стійкості до антибіотиків серед мікробних популяцій (Guruge et al., 2024). Це значно ускладнює лікування інфекційних захворювань і становить серйозну загрозу для світової охорони здоров'я. Дрейфуючий пластик є ідеальним засобом для сприяння біологічній інвазії, тобто для транспортування інвазійних видів на великі відстані, особливо через океанські течії. Описане явище також відоме під назвою рафтинг. Це стосується не лише мікроорганізмів, але й дрібних безхребетних та водоростей. Таке переміщення може призвести до порушення екологічної рівноваги у місцевих екосистемах.

Узагальнюючи, пластисфера – не просто мікробне угруповання, а екологічний феномен Антропогену, який демонструє здатність біосфери адаптуватися до надходження у природне середовище нових антропогенних матеріалів. Дослідження пластисфери дає підстави для прогнозування поведінки пластику в навколишньому середовищі, його токсикологічного потенціалу та ризиків, пов'язаних із поширенням резистентності та патогенів.

1.2. Головні агенти біодеградації пластику

У складі пластисфери домінують бактерії. Найчисельніші представники типів Протеобактерії, особливо гамма-протеобактерії та альфапротеобактерії, часто асоційовані з біорозкладом органічних сполук та морським середовищем (Zettler et al., 2013; Kirstein et al., 2016). Також широко представлені *Bacteroidetes*, які спеціалізуються на розкладанні складних полімерних органічних речовин, та *Cyanobacteria*, які беруть участь у первинному продукуванні.

Еукаріотичні мікроорганізми також є невід'ємною частиною пластисфери. Здебільшого до її складу входять різноманітні гриби (дріжджі та нитчасті міцеліальні форми), відомі здатністю виробляти потужні екзоферменти, здатні деполімеризувати складні субстрати. Діатомові водорості та інші мікроскопічні водорості також відіграють важливу роль, оскільки вони формують шари, що здійснюють фотосинтез. Найпростіші організми контролюють чисельність бактеріальних спільнот, поїдаючи їх (Zhai et al., 2023).

Агенти біодеградації – це біологічні об'єкти, здатні каталізувати хімічне розщеплення та мінералізацію складних синтетичних полімерних матеріалів до простіших сполук: олігомерів, мономерів, а зрештою до вуглекислого газу та води (Shah et al., 2008). Потенціал до деградації полімерів еволюційно закріплений у багатьох організмах, оскільки у природі вони постійно стикаються з розкладом стійких біополімерів, таких як лігнін, целюлоза та хітин.

Хоча у руйнуванні пластикових матеріалів можуть брати участь і вищі організми, такі як деякі безхребетні (личинки комах, наприклад, *Tenebrio molitor*), які забезпечують фізичну фрагментацію та внутрішню біодеградацію завдяки своїй кишковій мікробіоті, та деякі водорості, які можуть сприяти опосередкованому пошкодженню цілісності пластику, саме мікроорганізми розглядаються як головні агенти біодеградації. Їхня провідна роль обумовлена високою метаболічною різноманітністю, здатністю до швидкої генетичної адаптації та наявністю специфічного ферментативного апарату для розриву хімічних зв'язків у полімерних ланцюгах на молекулярному рівні (Mamtimin et al., 2023).

Бактеріальні угруповання, що формують біоплівку пластисфери, виконують роль первинних деградаторів. Їхня ефективність зумовлена високою швидкістю розмноження, генетичною мінливістю та здатністю до швидкої індукції синтезу необхідних ферментів у відповідь на появу пластикового субстрату (Yoshida et al., 2016).

Серед бактеріальних груп, що мають доведений потенціал руйнувати пластик, значне місце займають Протеобактерії. Це найпоширеніший тип мікроорганізмів у угрупованні, що розвивається на пластику. Класи Гамма- та Альфапротеобактерії містять багато штамів з гнучким метаболізмом (Zettler et al., 2013). Наприклад, такі роди, як *Pseudomonas* та *Vibrio*, часто виявляють як активних руйнівників. Вони здатні розкладати такі звичайні полімери, як поліетилен, поліпропілен та полістирол, за допомогою окислення їхніх довгих вуглеводневих ланцюгів (Urbanek et al., 2018).

Також важливими є Актинобактерії. Представники родів *Streptomyces* та *Rhodococcus* особливо значущі в ґрунтах і морських екосистемах. Вони відомі своєю здатністю руйнувати стійкі полімери, включаючи поліетилен та поліпропен (Tokiwa et al., 2009; Yoshida et al., 2016). Це пов'язано з їхньою природною функцією розкладання лігніну. Існує унікальна група мікроорганізмів, що спеціалізуються на руйнуванні поліетилентерефталату.

Відкриттям 2016 року стала бактерія *Ideonella sakaiensis* (Yoshida et al., 2016). Цей незвичайний мікроорганізм, виділений із середовища, забрудненого поліетилентерефталатом, може використовувати його як єдине джерело живлення. Цю функцію забезпечує синтез високоспецифічних ферментів. Крім того, деякі представники роду Бацили, наприклад, *Bacillus cereus*, також демонструють здатність розкласти поліетилен, особливо той, що попередньо піддався окисленню під впливом світла.

Гриби (мікроміцети) є незамінними агентами біодеградації, особливо у наземних та змішаних водних середовищах. Їхня перевага полягає у здатності проникати міцелієм глибоко у пористу структуру матеріалу та масштабно продукувати потужні позаклітинні ферменти, які можуть діяти на полімер поза межами клітини (Khatua et al., 2023).

Цвілеві гриби. Загальнопоширені роди *Aspergillus* та *Penicillium* часто виділяються з пластисфери і демонструють здатність до руйнування широкого спектру полімерів, включаючи поліетилен, полістирол та біорозкладні пластики типу полілактиду (Burcu Şimşek Uygun et al., 2024).

Гриби-руйнівники. Штами роду *Fusarium*, зокрема *Fusarium solani*, відомі своєю унікальною активністю щодо розкладання поліуретану – матеріалу, який є особливо складним для бактеріальної деградації через його хімічну стійкість (Ren et al., 2021).

Лігнінолітичні гриби. Базидіоміцети, що руйнують лігнін (один із найстійкіших природних полімерів), синтезують ферменти, які виявилися корисними для деградації пластику. Ці ферменти, наприклад, лактази та пероксидази, можуть атакувати хімічно стійкі полімери, що містять ароматичні кільця (Khatua et al., 2023).

На молекулярному рівні біологічне руйнування пластику є вузькоспеціалізованим процесом, що включає початкове розщеплення полімеру на дрібні частини (деполімеризацію) та подальше засвоєння цих частин мікроорганізмом. Мікроорганізми використовують різноманітні позаклітинні ферменти, які здебільшого належать до класів гідролаз (що

використовують воду для розриву хімічних зв'язків) або оксидаз (що використовують кисень) (Shimao et al., 2001).

Серед цих ферментів найбільш відомими є гідролази поліетилентерефталату (ПЕТ-ази), які виробляє бактерія *Ideonella sakaiensis* (Yoshida et al., 2016). Вони спеціалізуються на розриві ефірних зв'язків у поліетилентерефталаті. ПЕТ-ази розщеплюють поліетилентерефталат до олігомерів та димеру, який потім додатково руйнується іншим ферментом до мономерів. Ці мономери бактерія вже може засвоїти як поживні речовини.

Також ефективними є ліпази та естерази. Ці гідролази, які природно розщеплюють жири та ефіри, виявилися здатними руйнувати полімери, що містять ефірні зв'язки у своїй основній структурі, наприклад, полілактид та полікапролактон.

Оксидази та пероксидази, що виробляються переважно грибами (зокрема, лактази та лігнін-пероксидази), здійснюють потужні, але менш вибіркові окислювальні реакції (Temporiti et al., 2022). Вони можуть атакувати навіть хімічно стійкі полімери, як-от поліетилен, сприяючи розриву вуглець-вуглецевих зв'язків, особливо після попереднього окислення полімеру. Для руйнування складних поліуретанів необхідні уретанази – специфічні ферменти, які виробляються певними штамми грибів і бактерій і розривають уретанові зв'язки, дозволяючи мікроорганізмам використовувати цей полімер як джерело живлення (Khatua et al., 2023).

Ефективність руйнування пластику біологічними агентами сильно залежить від умов навколишнього середовища, оскільки синтетичні полімери за своєю природою стійкі, і процес їхнього розкладання є повільним (Cai et al., 2023).

Найважливішим чинником є внутрішня структура полімеру. Полімери з високою кристалічністю, які сильно відштовхують воду і мають велику молекулярну масу, такі як поліетилен та поліпропілен, дуже стійкі. Ферментам важко проникнути в їхню щільну структуру та отримати доступ до хімічних

зв'язків. Натомість, полімери з аморфною структурою, які менше відштовхують воду, руйнуються легше (Tournier et al., 2020).

Температура також має вирішальне значення. Більшість ферментів, що руйнують пластик, досягають максимальної активності при підвищених температурах, часто у діапазоні тридцять-сорок градусів Цельсія і вище. Оскільки це значно перевищує середні температури у Світовому океані, таке обмеження уповільнює розкладання в холодних водах, але робить термофільні мікроорганізми особливо цінними для біотехнологічного використання (Yoshida et al., 2016).

Крім того, більшість успішних шляхів руйнування пластику (окислення вуглець-вуглецевих зв'язків, гідроліз ефірних зв'язків) є процесами, що потребують кисню. Дефіцит кисню, який є типовим для глибоких морських осадів або закритих полігонів для сміття, значно сповільнює або повністю припиняє процес розкладання.

Важливу роль відіграє попередня деградація. Такі процеси, що відбуваються до колонізації мікроорганізмами, як фотоокислення під впливом ультрафіолетового випромінювання, механічно збільшують площу поверхні, утворюють тріщини та зменшують молекулярну масу полімеру. Це робить полімер більш придатним для змочування водою і, відповідно, більш доступним для дії мікробних ферментів (Ventura et al., 2024).

Мікроорганізми мають визначальну роль як головні агенти біодеградації синтетичних пластиків з кількох ключових причин, які тісно інтегровані з функціонуванням пластисфери (Zettler et al., 2013; Ventura et al., 2024). Саме їхня здатність до адгезії та формування біоплівки забезпечує необхідний фізичний контакт ферментів із гідрофобною поверхнею полімеру, що є початком усього процесу. Їхня ферментативна універсальність дозволяє адаптуватися до розкладання нових, раніше неіснуючих у природі субстратів, а їхня здатність до мінералізації забезпечує повне включення пластикового вуглецю у біогеохімічний цикл. Пластисфера, таким чином, є функціонально

активним мікробним консорціумом, селективно збагаченим цими агентами, що визначає долю пластикового забруднення в глобальних екосистемах.

1.3. Метааналіз – сучасний аналітичний інструмент наукових досліджень

Метааналіз та використання вторинних даних в екології мікроорганізмів виявився цінним інструментом для узагальнення розрізнених емпіричних результатів, отриманих у різних просторових масштабах, експериментальних умовах і за участю різних таксонів. Поєднання великої кількості незалежних досліджень дає змогу виявити узгоджені закономірності, які неможливо надійно встановити в межах окремих експериментів, зменшити вплив випадкових варіацій і підвищити статистичну силу висновків. За методичними рекомендаціями МОН України (Міністерство освіти і науки, 2024), «вторинні дані – це дані, які вже були раніше зібрані/отримані та оброблені». У екології мікроорганізмів під вторинними даними розуміють відкриті бази геномних, метагеномних, метатранскриптомних та функціональних спостережень.

В умовах експоненційного зростання кількості наукових публікацій з'явився новий підхід, який передбачає використання інструментів для синтезу та об'єктивної оцінки накопичених емпіричних даних. Метааналіз саме такий потужний кількісний підхід, спрямований на статистичне узагальнення результатів численних, незалежних наукових досліджень, які стосуються якогось конкретного наукового питання (Ященко, Леснікова, 2015; Gurevitch et al., 2018). Його основна мета полягає у виявленні загальних ефектів, тенденцій та закономірностей, які залишаються прихованими або суперечливими при розгляді окремих наукових робіт. Інструменти метааналізу дають змогу досліджувати екологічні ролі та адаптивні стратегії мікроорганізмів у масштабах, недоступних для класичних лабораторних підходів. Це робить такі методології важливими не лише для побудови більш надійних теоретичних моделей, але й для формування доказової бази щодо екосистемних функцій мікробів, оцінки їхньої реакції на антропогенні зміни

та прогнозування динаміки мікробних спільнот у природних і трансформованих середовищах.

Головна відмінність метааналізу від традиційного огляду літератури полягає у його строгій методології (Gurevitch et al., 2018). Тоді як теоретичний огляд лише описово зіставляє висновки, метааналіз застосовує складні статистичні методи для об'єднання розмірів ефектів (наприклад, середніх значень, кореляцій) з усіх включених досліджень. Це дозволяє розрахувати сукупний розмір ефекту, що значно підвищує статистичну потужність висновків, оскільки вони базуються на набагато більшій сукупності даних, ніж будь-яке окреме дослідження (Ященко, Леснікова, 2015; Higgins et al., 2003). Отож, метааналіз перетворює якісний огляд на кількісний, доказовий синтез, що дозволяє достовірно виявити узгодженість результатів або ідентифікувати джерела розбіжностей між дослідженнями.

Такий підхід набув великого значення у природничих науках та екології, де експерименти часто проводяться у географічно різних локаціях та з використанням різноманітних методик. Через високу природну мінливість екологічних систем висновки, отримані в одному локальному експерименті, не можуть бути достовірно екстрапольовані на глобальний рівень.

Метааналіз вирішує цю проблему, дозволяючи узагальнити дані з багатьох локальних досліджень, виявляючи глобальні закономірності у відповідь екосистем на антропогенні фактори. Це стосується впливу забруднення, зміни клімату, а також оцінки ефективності природоохоронних заходів чи біоремедіаційних технологій. У сфері екологічної мікробіології та біоремедіації цей метод допомагає статистично визначити загальну ефективність нових технологій, а також виявити, які чинники дають найбільш стабільний і потужний ефект у різних природних умовах (Senior et al., 2016).

Метааналіз використовується в багатьох наукових галузях, проте в екології він є важливим інструментом для оцінки загальних наслідків, таких як вплив деградації ґрунтів, вплив кліматичних змін на живі угруповання, а також ефективність біотехнологічних процесів. Дослідження біологічного

руйнування пластику, зокрема, відрізняються значною неоднорідністю, яка проявляється у трьох основних напрямках (Zettler et al., 2023). По-перше, існує велике різноманіття типів полімерів (таких як поліетилентерефталат, поліетилен, поліпропілен, полістирол), кожен з яких має різну хімічну стійкість. По-друге, використовується широкий спектр біологічних агентів – різні штами бактерій та грибів, кожен із яких володіє унікальною здатністю виробляти специфічні ферменти. По-третє, спостерігається значна варіативність умов середовища, в яких проводяться експерименти, включаючи температуру, солоність та рівень кисню.

Метод дозволяє узагальнити ці численні експериментальні дані, даючи підстави для формулювання обґрунтованих висновків. Він дає можливість визначити, які типи полімерів мають найвищу швидкість біодеградації (Zrimes et al., 2019), які мікробні таксони є найбільш ефективними "головними агентами" у кількісному вираженні, а також які умови середовища (наприклад, підвищена температура чи попередня УФ-деградація) є найбільш критичними для стимулювання процесу розкладу, незалежно від конкретного місця дослідження. Крім того, метааналіз допомагає встановити універсальний зв'язок між таксономічним складом пластисфери та її функціональним потенціалом до деградації.

Таким чином, метааналіз у цьому дослідженні є потужним інструментом, що допомагає перейти від опису окремих успішних випадків біодеградації до формування обґрунтованих, доказових висновків щодо глобальних закономірностей і факторів, які керують процесом руйнування пластику.

Використання метааналізу значно підвищує якість і доказовість наукових висновків у сфері екології та мікробіології (Nakagawa et al., 2023). Завдяки статистичному об'єднанню даних з великої кількості незалежних досліджень, цей метод ефективно зменшує вплив помилок вибірки та мінімізує суб'єктивні інтерпретації, які часто виникають під час аналізу окремих, локальних експериментів.

Метааналітичний підхід забезпечує високий рівень наукової достовірності завдяки об'єднанню даних, що підтверджується двома основними перевагами. Один аспект полягає у збільшенні статистичної потужності: синтезуючи результати багатьох досліджень, він суттєво розширює загальну вибірку. Це дає змогу дослідникам виявляти навіть невеликі, але стійкі ефекти, які могли б залишитися статистично невидимими в окремих, менших роботах. Таким чином, отримані висновки стають значно надійнішими та більш універсальними. Інший важливий аспект – це об'єктивізація результатів. Застосування суворих статистичних методів для узагальнення даних гарантує неупередженість висновків. Це є вагомим перевагою над простими якісними оглядами, де інтерпретація може бути суб'єктивно зміщена на користь акцентування певних результатів (Nakagawa et al., 2023).

З огляду на це, у двадцять першому столітті метааналіз являє собою дієвий інструмент доказової науки. У сфері дослідження мікробних угруповань пластисфери він дозволяє науковій спільноті перейти від розрізнених спостережень щодо здібностей окремих штамів до загального, кількісно обґрунтованого розуміння біологічних процесів. Це є необхідним для успішного розроблення ефективних біотехнологічних рішень, спрямованих на боротьбу із забрудненням пластиків відходами.

Розділ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Матеріали, об'єкт та предмет дослідження

Об'єкт дослідження: процеси біодеградації синтетичних полімерів, що здійснюються мікроорганізмами в природних та лабораторних умовах, а також екологічна структура, що їх об'єднує, відома під назвою пластисфера.

Предмет дослідження: видовий склад пластисфери, кількісна ефективність біодеградації різних типів пластику мікробними агентами, а також вплив ключових факторів на швидкість та ступінь деградації. Аналіз зосереджений на показниках, що піддаються статистичному узагальненню.

Матеріалами дослідження слугував набір вторинних емпіричних даних, екстрагований з наукових статей, опублікованих протягом 2025 року станом на момент дослідження.

Пошук літературних джерел був здійснений у науковій базі даних ScienceDirect, яка забезпечує широке охоплення журналів у галузі екології, біотехнології та мікробіології. Стратегія пошуку інформації була багатоетапною, розробленою спеціально для того, щоб максимально зменшити включення нерелевантних оглядових статей та робіт, які не містять необхідних кількісних даних. Для забезпечення прозорості метааналізу керувалися міжнародним стандартом PRISMA, який регламентує процес пошуку, відбору й представлення результатів.

Після послідовного вилучення нерелевантних джерел було обрано 44 англomовні наукові статті, які містять дані щодо біодеградації пластику. Проведені авторами дослідження були проведені або використовували зразки, зібрані у таких країнах: Саудівська Аравія, Мексика, Індія, Китай, Індонезія, Південна Корея, Єгипет, Іспанія, Австрія, Німеччина, Латвія, Іран, Марокко, Туніс, Швейцарія, Чехія, Нова Зеландія, Північна Ірландія, Таїланд, Пакистан, а також у регіонах Південної Атлантики, Південного океану, Антарктики.

Сумарно набір даних містить кількісні значення щодо біодеградації 11 типів пластику: LDPE (17 статей), PE (11 статей), PP (11 статей), PS (6 статей),

PET (5 статей), PVC (4 статті), HDPE (4 статті), PU (2 статті), PLA (1 стаття), PBAT (1 стаття), PCL (1 стаття).

PE (поліетилен) – найбільш широко вироблюваний пластик у світі, відомий своєю хімічною інертністю та відносною дешевизною. Існує в різних формах (HDPE, LDPE, LLDPE), які відрізняються за щільністю та гнучкістю, і використовується практично у всіх сферах господарської діяльності – від пакування до будівництва. В 11 аналізованих статтях дослідження стосувалися PE без додаткової інформації щодо різновиду. HDPE (поліетилен високої щільності) – більш жорстка, міцна та термостійка форма поліетилену завдяки більш щільній молекулярній структурі. Використовується для виготовлення пляшок для миючих засобів, міцних контейнерів, іграшок, труб та сміттєвих баків. LDPE (поліетилен низької щільності) характеризується високою гнучкістю, м'якістю та хорошою стійкістю до ударів, але має низьку температуру плавлення. Це один із найбільш поширених пластиків для виготовлення пакетів, плівок для упаковки, кришок та гнучких контейнерів, через що є значним забруднювачем.

PVC (полівінілхлорид) – другий за обсягами виробництва тип пластику, жорсткий у непластифікованій формі, проте може бути зроблений гнучким при додаванні пластифікаторів. Застосовується для виготовлення віконних профілів, труб, кабельної ізоляції та медичних виробів, але його виробництво та утилізація викликають екологічні питання через вміст хлору.

PP (поліпропілен) – напівкристалічний термопластик, відомий своєю високою стійкістю до хімічних речовин, тепла та зношування. Широко використовується у виробництві автомобільної промисловості, пакувальних матеріалів (контейнери, кришки) та текстилю. Він легший за PE, але має вищу температуру плавлення.

PS (полістирол) – твердий, прозорий та крихкий полімер, який може бути спінений для створення легкого пінополістиролу, відомого як пінопласт. Використовується для виготовлення одноразового посуду, упаковки для харчових продуктів та теплоізоляційних матеріалів.

PET (поліетилентерефталат) – міцний, легкий та прозорий поліестер, який є дуже стійким до газів та вологи. В основному використовується для виготовлення пластикових пляшок та для виробництва синтетичних волокон поліестеру.

PU (поліуретан) належить до полімерів, які можуть існувати як термопласти, еластomers, або піни, використовується у виробництві меблів, утеплювачів, еластомерів, покриттів та клеїв, а також є важливим компонентом у синтетичних шкірах та підшвах взуття.

PBAT (полібутиленадипат-ко-терефталат) – біорозкладаний і компостований кополіестер, відомий своєю гнучкістю та здатністю розкладатися в промислових компостних установках. Його властивості схожі на властивості LDPE, тому він часто використовується для виробництва біорозкладних плівок, пакетів та упаковки. Статті щодо розкладання мікроорганізмами PBAT до даного дослідження включені не були. Однак він досліджувався сумісно із іншими типами пластику у складі пластисфери мангрових осадів Хайнаню у Китаї (Su et al., 2025). У цій статті також були наявні дані щодо біорозкладаного поліестеру PCL (полі(ε-капролактон)), який має низьку температуру і високу гнучкість, що дозволяє йому легко руйнуватися мікроорганізмами. Використовується в медицині та у виробництві біопластику. PLA (полімолочна кислота) – ще один біорозкладаний поліестер, вироблений з відновлюваних ресурсів, наприклад, з кукурудзяного крохмалю. PLA жорсткий, прозорий і часто використовується в 3D-друці, упаковці для харчових продуктів та одноразовому посуді як екологічна альтернатива традиційним пластикам (Su et al., 2025).

2.2. Методи дослідження

Дослідження із дотриманням методології метааналізу за міжнародним стандартом PRISMA (рис. 2.1).

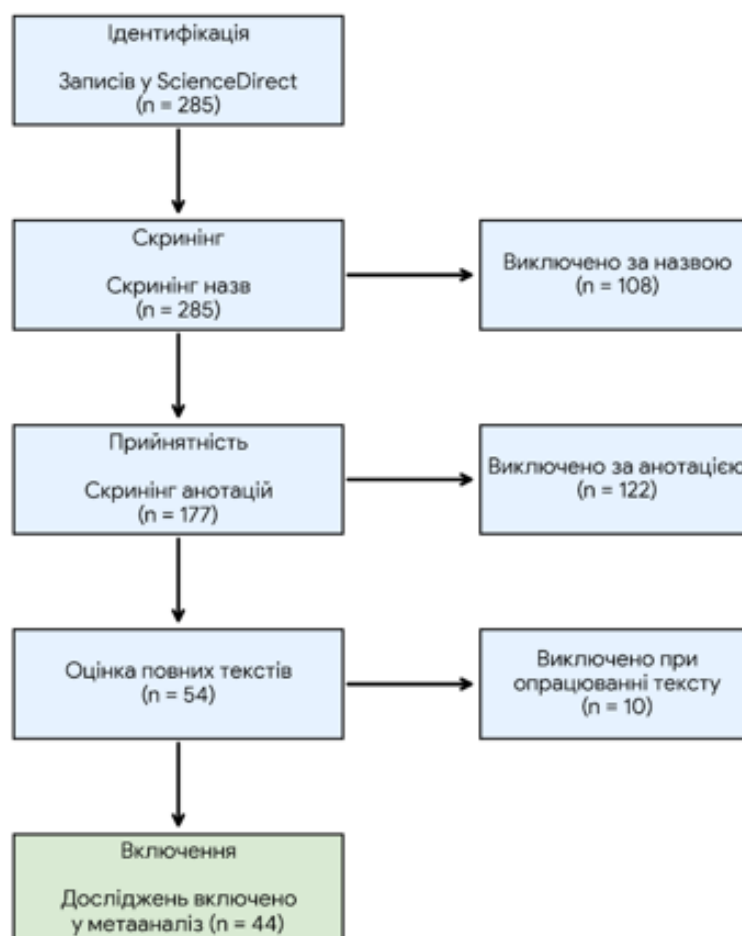


Рис. 2.1. Алгоритм формування пулу джерел за міжнародним стандартом PRISMA

Початковий етап ідентифікації полягав у широкому охопленні публікацій, присвячених дослідженню біодеградації пластику мікроорганізмами пластисфери, за допомогою розширеного пошукового запиту (рис. 2.1). Пошуковий запит складався з комбінації ключових слів, що описують процес деградації, об'єкти дослідження та тип експерименту (табл. А.1). Фінальний рядок запиту мав такий вигляд: *"plastic biodegradation" OR "polymer degradation", "degradation rate" OR "mass loss" OR "weight loss", "bacteria OR fungi", та "laboratory OR experiment"*. За цим запитом було знайдено 3099 праць.

Далі було застосовано додаткові фільтри для звуження вибірки та забезпечення її релевантності. Тип публікації було обмежено лише до «Research article», щоб виключити огляди та тези, а період публікації звужено до 2020–2025 років для врахування найновіших досягнень (табл. А.1). Після застосування цих фільтрів кількість праць зменшилася до 285 (рис. 2.1). Бібліографічний список експортовано у форматі *.bib до бібліографічного контент-менеджеру Zotero (рис. А.1) для швидкого доступу до повнотекстових версій першоджерел.

На **етапі скринінгу** було проведено послідовний двоетапний відбір на основі критеріїв включення/виключення. Спочатку було виключено 108 статей за назвою (наприклад, ті, що стосувалися комп'ютерного моделювання біодеградації), потім 122 статті виключили після перегляду анотацій (наприклад, дослідження біопластиків) (рис. А.2). Для формування фінальної вибірки були встановлені чіткі критерії включення/виключення.

Критерії включення:

- стаття у науковому журналі
- експериментальні дослідження (lab, incubation, microcosm);
- вивчення мікроорганізмів (бактерії/гриби), що розкладають пластик;
- наявність кількісних даних (маса, % втрати, CO₂, зміна полімеру)

Критерії виключення:

- книги, розділи книг, тези конференцій, дисертації та автореферати тощо;
- оглядові статті без експериментів;
- дослідження ферментів *in silico* або генної інженерії без оцінки деградації;
- статті про біопластик / синтез полімерів, а не їх розкладання;
- розкладання біопластика;
- генетично модифіковані штами
- нечіткі або неповні дані.

Після застосування цих правил, 54 фінально включені статті сформували основний масив даних для подальшого метааналізу. Нарешті, 10 статей було виключено під час опрацювання повного тексту через неповні або нечіткі дані.

На етапі формування масиву вторинних даних з кожної відібраної статті були вилучені основні показники для метааналізу у вигляді електронної таблиці (рис. А.3).

На етапі систематичного аналізу було ідентифіковано і проаналізовано змінні метааналізу.

Залежною змінною, яка є мірою ефекту слугували кількісні показники: втрата маси полімеру, зниження молекулярної маси, дегалогенізація. *Незалежні змінні* (так звані модератори), які, ймовірно, впливають на результат, були класифіковані за трьома групами. До *біологічних модераторів* віднесли таксономічну належність агента біодеструкції; до *хімічних* – тип пластику, до *операційних* – загальна тривалість експерименту, попередня обробка. Такий набір змінних забезпечує необхідну різноманітність даних, що дозволяє провести кількісну оцінку впливу різних зовнішніх та внутрішніх чинників на швидкість і ступінь біологічного руйнування пластику.

На етапі статистичної обробки результатів використано модель випадкових ефектів (random-effects model) (Ященко, Леснікова, 2015) на основі даних про швидкість біодеградації LDPE/PE з 15 досліджень ($k=15$), які ми витягли з наданих статей.

Статистичну обробку результатів та метааналіз проводили в середовищі статистичного програмування R (з використанням бібліотек *metafor*, *dplyr* та *ggplot2*). У додатку Б наведено код R, побудований і вдосконалений нами за допомогою ChatGPT.

Візуалізацію результатів виконано за допомогою діаграми forest plot, яка відображає індивідуальні розміри ефектів з 95% довірчими інтервалами та воронкової діаграми для візуальної оцінки наявності публікаційного зміщення.

Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Склад мікробіому пластисфери

За результатами аналізу 44 наукових джерел, встановлено певні закономірності в дослідженнях структури мікробіому пластисфери.

Рисунок 3.1 демонструє, що серед досліджених мікроорганізмів найбільшу частку становлять бактерії – 75 %, тоді як гриби згадуються у 20 % випадків. Меншу представленість мають мікроводорості та інфузорії, які зустрічаються відповідно у 3 % та 2 % джерел. Такий розподіл узгоджується із загальними тенденціями колонізації пластику угрупованнями мікроорганізмів (Zettler et al., 2013). Таке співвідношення відповідає даним польових досліджень, у яких бактеріальні угруповання стабільно формують основне ядро пластисфери, тоді як гриби трапляються рідше й зазвичай виконують допоміжні або спеціалізовані функції у біодеградаційних консоціумах. Інші групи мікроорганізмів виявляються епізодично та переважно на ранніх або стабілізаційних етапах колонізації полімерів у природних умовах (Zhai et al., 2023).



Рис. 3.1. Кількісна характеристика груп мікроорганізмів, наведених у опрацьованих наукових статтях.

Ця кількісна ознака може свідчити, що бактерії є найчисленнішими представниками пластисфери, тому й викликають інтерес у науковців. Найбільш представлена у дослідженнях група *Proteobacteria* здатна працювати в різних середовищах, зокрема в морських ділянках, у ґрунті та на сміттєзвалищах. Вони здатні руйнувати важкі пластикові матеріали, такі як PE, використовуючи спеціальні ферменти. Наприклад, *Vibrio fortis* зруйнував 71,19% ваги LDPE (Xue et al., 2025), а *Acinetobacter baumannii* – 33,3 % втрати ваги PP (Lesuis et al., 2025) і 27,1% PVC за 50 днів (Li et al., 2025). Їхні дії включають дехлорування з PVC. Інші групи, такі як *Bacteroidota* та *Actinomycetota*, допомагають у подальшому розщепленні менших продуктів.

Гриби, які згадуються приблизно в 20% випадків, виконують роль у руйнуванні дуже твердих пластиків. Вони здатні виділяти сильні ферменти, які розривають молекулярні ланки, і здійснюють фізичне проникнення через гіфи, що ефективно здійснює початок біологічного розкладання. Прикладом може бути *Phanerochaete chrysosporium*, який здійснив 49,16% розкладання PE через поглинання мікрочастинок для внутрішньоклітинної переробки за допомогою beta-окислення (Su et al., 2025).

Мікроводорості, які зустрічаються лише в двох дослідженнях, часто є ранніми колонізаторами на пластику у водних середовищах (Joseph et al., 2025). Вони сприяють формуванню первинної біоплівки та, через фотосинтез, можуть впливати на параметри середовища, такі як рН та концентрація кисню, що, у свою чергу, стимулює прикріплення та активність гетеротрофних бактеріальних деградаторів.

Інфузорії (Aiyun Li et al., 2025), представлені *Tetrahymena thermophila*, є активними агентами деградації нанопластику, оскільки, на відміну від попередніх припущень, вони не лише опосередковано впливають на процес, а й здійснюють пряме розщеплення полімерних ланцюгів за допомогою гідролаз у своїй травній системі. Цей процес призводить до зміни фізичних властивостей нанопластику та його виведення у вигляді фекальних гранул, що впливає на його долю, транспортування та біодоступність в акваторіях.

Через усі релевантні документи простежується домінування бактерій з філумів Proteobacteria як основний компонент у мангрових седиментах, океанських водах, річкових седиментах, сміттєзвалищах і ґрунтах та Bacteroidota, зокрема, у пластисфері на РЕ в океанських і ґрунтових середовищах (табл. В.1). Часто згадуються таксони з потенціалом біодеградації, такі як Alcanivorax, Halomonas, Pseudomonas і Mycobacterium, які сприяють окисненню та гідролізу пластику (рис. 3.2).

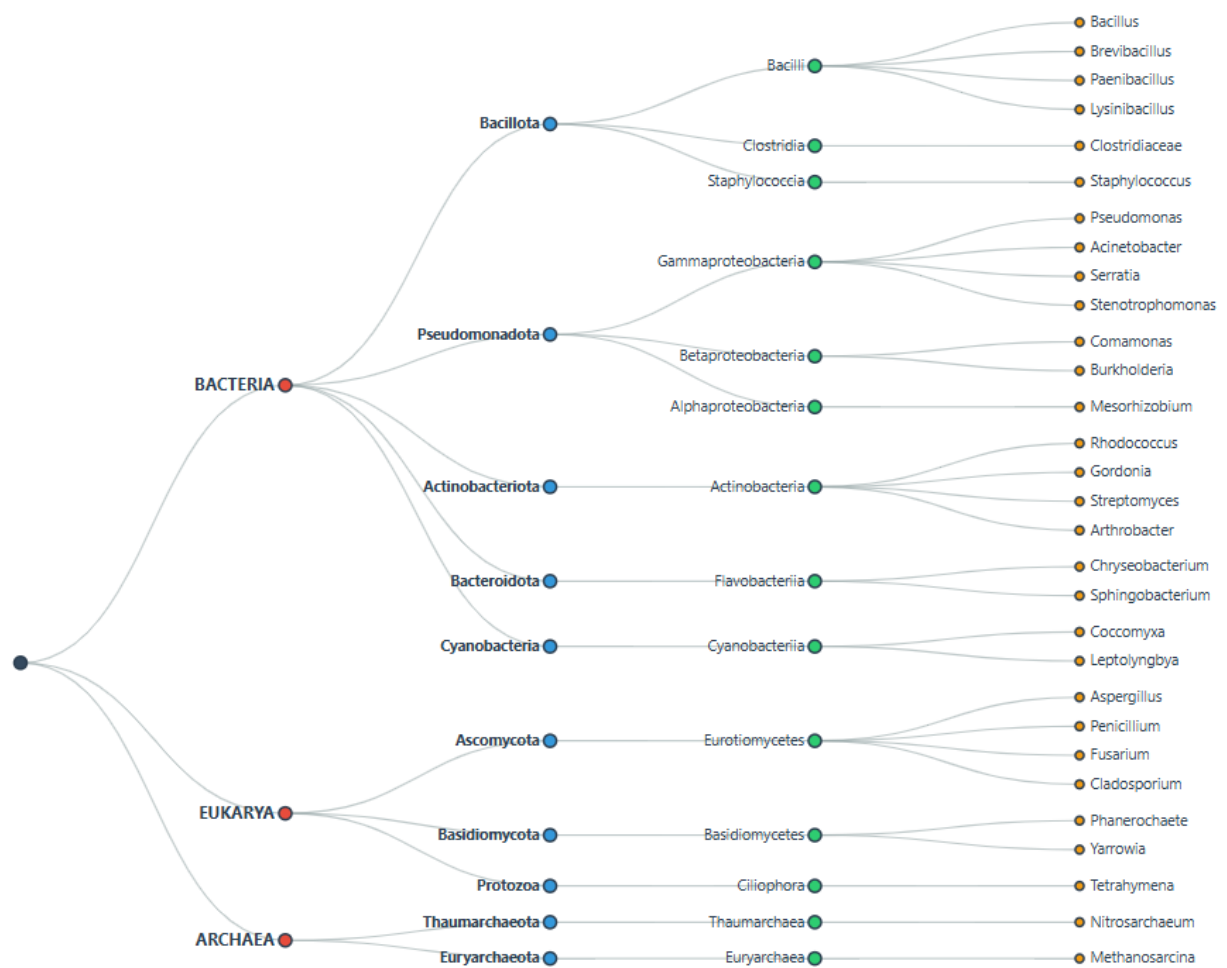


Рис. 3.2. Філогенетичне дерево, що охоплює всі роди аналізованого набору даних

Проаналізовано таксономічну структуру мікроорганізмів пластисфери, яка засвідчує розподіл організмів між трьома основними доменами життя: Bacteria, Eukarya та Archaea (рис. 3.2). Домен Bacteria має найбільшу родову представленість, що відповідає їхній основній ролі у біодеградації (Zettler et al., 2013; Zhai et al., 2023). У його складі домінують представники класів

Gammaproteobacteria (*Pseudomonas*, *Acinetobacter*), Alphaproteobacteria (*Sphingomonas*, *Rhodopseudomonas*), Actinobacteria (*Rhodococcus*, *Mycobacterium*, *Gordonia*, *Streptomyces*), Firmicutes (*Bacillus*, *Lysinibacillus*) та Bacteroidia (*Flavobacterium*, *Chryseobacterium*). Ці таксони неодноразово підтверджені в досліджуваних роботах як ключові колоністи пластикових поверхонь та активні деградаторів, що здатні утворювати біоплівки, продукувати гідролітичні й оксидативні ферменти (алкан-гідроксилази, лакази, естерази, ліпази) та забезпечувати втрату ваги поліетилену від 4 до 26% залежно від умов і складу консорціуму (Hu, 2025; Alidoosti, 2025; Cabiglieri, 2025; Dhanraj, 2025; Tirkey, 2025; Pereira, 2025; Li, 2025; Merchant, 2025; Muangchinda, 2025; Kong, 2025).

Філум Pseudomonadota найбільш різноманітний, такі як *Pseudomonas* та *Acinetobacter*, а також *Comamonas*, які відомі своїми здібностями до окиснення полімерів. Філум Bacillota представлено родами *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Lysinibacillus* та Actinobacteriota, що є важливими продуцентами ферментів, що розщеплюють стійкі полімерні ланцюги. Крім того, філум Cyanobacteria відіграє роль перших колонізаторів і формувачів біоплівки в водних екосистемах.

У домені Eukarya домінують гриби, а також представлені мікроводорості (*Coccomyxa* sp., *Leptolyngbya* sp.), які демонструють високу ефективність деградації попередньо окисненого або обробленого пластику (Okal, 2025; Lesuis, 2025; Buron-Moles, 2025; Joseph, 2025). Філум Ascomycota включає важливі для біодеградації роди, такі як *Aspergillus*, *Penicillium* та *Fusarium*, які виконують ферментативне розщеплення пластику. Філум Basidiomycota, є оптимальним організмом для руйнування високостійких полімерів завдяки потужним окислювальним ферментам.

Домен Archaea представлено філумами Thaumarchaeota та Euryarchaeota, включаючи Nitrososphaera та Methanosarcina. Їхня присутність свідчить про залучення архей до анаеробних етапів біогеохімічного циклу, особливо в умовах сміттєзвалищ або глибоких ґрунтових шарів, де відбувається кінцеве

перетворення органічних залишків і продуктів розпаду пластику (Merchant, 2025; Kong, 2025).

Крім того, присутність найпростіших (Protozoa), представленої *Tetrahymena* (Ciliophora), вказує на складну мікробну харчову мережу, де ці організми здатні безпосередньо руйнувати нанопластик під час його поглинання, застосовуючи ферменти своєї травної системи (Aiyun Li et al., 2025)

3.2. Ефективність біодеградації пластику різних типів

З літератури відомо, що поліетилен, поліпропілен, полістирол та поліетилентерефталат є найбільш поширеними синтетичними полімерами у світі (Barnes et al., 2009). Наведена на рисунку 3.3 діаграма демонструє частку різних типів пластику, які досліджувалися авторами у аналізованих нами 44 джерелах.

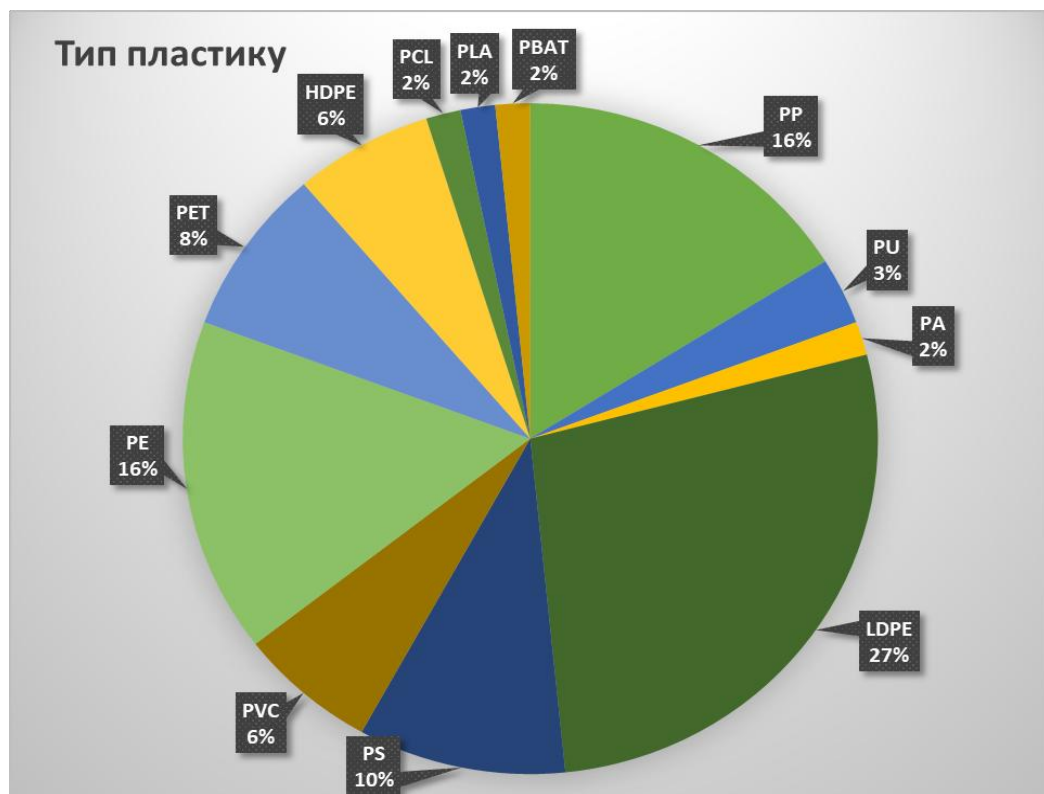


Рис. 3.3. Кількісна характеристика типів пластику, наведених у опрацьованих наукових статтях

Загалом, дослідження охоплюють 11 різних типів полімерів: PE без уточнення, LDPE, HDPE, PP, PS, PET, PVC, PU, PA, PCL, PLA та PBAT, що

свідчить про спробу наукової спільноти оцінити біодеградаційний потенціал широкого спектру матеріалів. Це підкреслює науковий стратегічний інтерес до полімерів як первинного, так і вторинного забруднення. Найчастіше згадується LDPE (27 %), за ним йдуть PE та PP по 16 % кожен. Інші види пластику, такі як PS, PET, PVC та HDPE, мають частку від 6 % до 10 %, а PCL, PLA, PBAT та PA зустрічаються найрідше – по 2 % або 3 % (рис. 3.3).

Таке домінування LDPE в аналізованих роботах пояснюється кількома факторами, що стосуються його широкого використання та поширеності у навколишньому середовищі. LDPE є одним із найбільш поширених полімерів у світі, використовується для виробництва пакувальних плівок, пакетів, сільськогосподарської мульчі та контейнерів. Саме через його широке застосування в пакуванні та сільському господарстві він стає найбільш поширеним забрудником у ґрунтових та водних екосистемах.

LDPE вилучався з різноманітних середовищ, що вказує на його повсюдне поширення та доступність для вивчення. Значна кількість досліджень зосереджена на зразках, отриманих зі звалищ (Xue et al., 2025, Tirkey et al., 2025; Merchant et al., 2025), де LDPE становить велику частку сміття. Крім того, він часто виділявся із сільськогосподарських ґрунтів (Omidoyin et al., 2025; Muangchinda et al., 2025), забруднених плівками для мульчування, та морських осадів (Lestari et al., 2025; Zidannajiyah et al., 2025), що відображає його легку міграцію через водні шляхи. Навіть такі специфічні джерела, як паливний бак літака (Buron-Moles et al., 2025), вказують на його стійкість і поширення в інженерних системах.

Висока частка LDPE (27%), а також сумарна частка поліетиленів (LDPE, PE, HDPE), що становить 49% усіх досліджень, відображає науковий пріоритет, спрямований на боротьбу з поліолефінами (рис. 3.3). Це найбільша група пластикових відходів, які характеризуються гідрофобністю та хімічною інертністю, що робить їх основними об'єктами для пошуку біодеградаційних рішень.

Інші полімери, що широко використовуються, також були вилучені з відповідних місць їхнього накопичення. Поліпропілен (який становив 16% від усіх знахідок) часто знаходили на звалищах (Xue et al., 2025; Choonut et al., 2025) та у морських екосистемах (Goudriaan et al., 2025), що цілком відображає його застосування у виробництві контейнерів, волокон та рибальських сіток.

Полістирол (близько 10%), хоча його часто досліджують у лабораторних умовах, також виділяли з ділянок, багатих на бактерії, що руйнують лігнін (Qiu et al., 2025), а також із водно-болотних угідь (Coughlin et al., 2025), що підтверджує його присутність у ґрунтових екосистемах. Полівінілхлорид (близько 6%) досліджували на зразках, взятих зі звалищ (Andleeb et al., 2025, Bansal et al., 2025) і навіть із ґрунту альпійських лук (Jiang et al., 2025). Це вказує на його потрапляння у навколишнє середовище, зокрема, через витік із будівельних матеріалів та труб.

Нами систематизовано емпіричні дані про діапазони ефективності біодеградації різних типів пластику. Це дозволило нам з'ясувати, що показник втрати маси – найбільш використовуваний, оскільки він забезпечує пряме та кількісне вимірювання мінералізації або значного перетворення полімеру на розчинні продукти. Зниження молекулярної маси вимірює розрив довгих полімерних ланцюгів на коротші олігомери, що є першим критичним кроком у біодеградації, оскільки лише низькомолекулярні продукти можуть бути засвоєні мікроорганізмами. Водночас дегалогенація є специфічним хімічним показником для галогенованих полімерів, таких як PVC, і відображає руйнування їхньої стабілізуючої структури шляхом видалення атомів хлору, що є необхідною умовою для подальшого біологічного розкладу вуглецевої основи полімеру.

Серед полімерів, оцінених за втратою маси, PP демонструє найширший діапазон ефективності – від 2,50 % до 35,00 %, що вказує на сильну мінливість його розкладу залежно від умов. Порівняння поліетиленів показує, що LDPE досягає деградації до 19,44 %, тоді як HDPE є найбільш стійким, з максимальною втратою маси лише 6,60 %. Ця різниця є абсолютно

очікуваною, адже відбиває його вищу кристалічність. PS та PU показують помірні показники – близько 13 % та 19 % відповідно. Для PVC ефективність деградації, оцінена через дегалогенацію (виділення хлориду), досягає високих значень – від 87,6 % до 100 % (табл. 3.1). Ці дані підсумовують, що біодеградація залежить від хімічних властивостей полімеру і характеру мікробного впливу.

Таблиця 3.1

Ефективність біодеградації пластику різного типу

Тип пластику	Ефективність деградації	Показник деградації	Автори
PP	2,50 % – 35,00 %	втрата маси	Tousizadeh et al., 2025; Coughlin et al., 2025; Xue et al., 2025
LDPE	0,35 % – 19,44 %	втрата маси	Pereira et al., 2025; Lestari et al., 2025; Omidoyin et al., 2025; Dhanraj et al., 2025; Tirkey et al., 2025
HDPE	1,05 % – 6,60 %	втрата маси	Pereira et al., 2025; Newrick et al., 2025
PET	2,76 % – 13,23 %	втрата маси	Pereira et al., 2025; Abelouah et al., 2025; Giyahchi et al., 2025
PS	~13 %	втрата маси та зниження молекулярної маси	Abelouah et al., 2025; Yuan et al., 2025; Coughlin et al., 2025
PVC	87,6 % – 100 %	дегалогенація	Andleeb et al., 2025; Jiang et al., 2025
PU	~19 %	зниження молекулярної маси	Okal et al., 2025; Magaña-Montiel et al. (2024)

Додатково проаналізовано ефективність розкладання пластику різних типів різними представниками угруповань пластисфери (табл. 3.2). Важливо відмітити, що біодеградація пластику різними мікроорганізмами здійснюється за рахунок низки специфічних біохімічних та фізичних механізмів, які залежать від типу організму та хімічної структури полімеру.

Таблиця 3.2

Ефективність біодеградації пластику різними мікроорганізмами

Тип мікроорганізму	Тип пластику	Ефективність деградації	Час інкубації в добах	Агент деградації	Автор
Бактерії (чиста культура)	PP	19,4 – 35% (втрата маси)	≤ 30	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Acinetobacter baumannii</i>	Tousizadeh et al. (2025); Bansal et al. (2025)
	HDPE	12,3–18,1% (втрата маси)	8 – 30	<i>Comamonas testosteroni</i> , <i>Bacillus firmus</i>	Newrick et al. (2025)
	LDPE	1,5–20% (втрата маси)	30 – 120	<i>Bacillus paramycoides</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Serratia marcescens</i>	Tirkey et al. (2025); Kyaw et al. (2012); Xiong et al. (2025)
	PVC	27,1% (втрата маси); 87,6–100% (дегалогенація)	50	<i>Acinetobacter baumannii</i> , <i>Bacillus mycoides</i> , <i>Bacillus megaterium</i>	Bansal et al. (2025); Andleeb et al. (2025)
	PS	7,0% (втрата маси)	7	<i>Raoultella sp.</i>	Yuan et al. (2025)
Мікробний консорціум	LDPE	0.51–19,4% (втрата маси)	42 – 120	консорціум звалища; консорціум актиноміцетів	Pereira et al. (2025); Lestari et al. (2025); Merchant et al. (2025)

Гриби (чиста культура)	LDPE	5,3– 17,5% (втрата маси)	30	<i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Sarocladium strictum</i>	Omidoyin et al. (2025); Alidoosti et al. (2025); Philip et al. (2020)
	PU	~19% (зниження молекулярної маси)	-	<i>Lasiodiplodia iranensis</i>	Okal et al. (2025)
	PE	0,33% (мініралізація)	30	<i>Aspergillus terreus</i> <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Lesuis et al. (2025); Li et al. (2025)
	LDPE	Якісна активність	30	<i>Yarrowia lipolytica</i>	Buron-Moles et al. (2025); Liu et al. (2025)
змішаний консорціу м (бактерії + гриби)	LDPE	7,9% (Втрата маси)	28	ко-культура <i>Bacillus velezensis</i> (бактерія) + <i>Sarocladium strictum</i> (гриб).	Alidoosti et al. (2025)
Мікровод орості, протозої	PS	Якісна оцінка	-	Інфузорії (<i>Tetrahymena thermophila</i>) мікроводорості (<i>Coccomyxa sp.</i>)	Joseph et al. (2025); Li et al. (2025)

Бактерії, такі як *Bacillus subtilis*, *Acinetobacter baumannii* та *Pseudomonas aeruginosa*, є первинними окислювачами полімерів. Їхня деградаційна активність ґрунтується на секреції позаклітинних ферментів, які ініціюють розрив полімерних ланцюгів: для розкладу інертних поліолефінів (PE, PP) бактерії застосовують ферменти, такі як монооксигенази, які вводять кисень у вуглецевий ланцюг, перетворюючи його на гідрофільні сполуки; для PVC, *Acinetobacter baumannii* та *Bacillus mycoides* застосовують механізм

дегалогенації (Andleeb et al 2025), що призводить до руйнування стабілізуючої структури полімеру та подальшого доступу до вуглецевої основи.

Гриби (*Aspergillus*, *Phanerochaete*, *Fusarium*) пропонують унікальні властивості завдяки своїй здатності до фізичного проникнення та продукування потужних неспецифічних окислювальних ферментів. Гриби білої гнилі, такі як *Phanerochaete chrysosporium* (Lesuis et al 2025), виділяють лігнінолітичні ферменти (лактази, марганцеві пероксидази), які використовують вільні радикали для окиснення, що дозволяє їм атакувати інертні вуглецево-водневі зв'язки у РЕ. Крім хімічного розкладу, грибні гіфи фізично проникають у полімерну матрицю, викликаючи її біорозтріскування, що критично збільшує площу поверхні для подальшої ферментативної атаки.

Мікроводорості (Joseph et al., 2025) та інфузорії (Aiyun Li et al., 2025) відіграють унікальні ролі у пластисфері, що виходять за межі простого опосередкованого впливу, роблячи біодеградацію синергетичним процесом. Мікроводорості, такі як *Coscomyxa* sp., часто є ранніми колонізаторами на пластику у водних середовищах. Вони сприяють формуванню первинної біоплівки і, як первинні продуценти, можуть локально змінювати хімічне середовище (зокрема, збільшувати концентрацію кисню), що є сприятливим фактором для діяльності аеробних бактерій-деградантів. Водночас, інфузорії, представлені *Tetrahymena thermophila*, здатні безпосередньо руйнувати нанопластик (PS-NPs) під час його поглинання. Цей механізм прямої деградації здійснюється за рахунок гідролаз у травній системі клітини та призводить до зміни фізичних властивостей нанопластику, що свідчить про новий, немікробний шлях розкладу.

Таким чином, біодеградація є комплексним процесом, де бактерії та гриби забезпечують пряме хімічне руйнування полімерів, а інші мікроорганізми модулюють середовище та беруть участь у розщепленні найменших фрагментів.

Проведений нами аналіз масиву вторинних даних засвідчує значний вплив попередньої обробки на відносну ефективність біодеградації різних

типів полімерів, що проявляється у зміні швидкості втрати маси, дегалогенації, та зниженні молекулярної маси (табл. 3.3). Водночас результати свідчать, що оптимальна попередня обробка є специфічною та визначається хімічною й кристалічною структурою полімеру.

Таблиця 3.3

Вплив попередньої обробки та умов експерименту на ефективність біодеградації пластику

Тип пластику	Вид попередньої обробки пластику					Автор
	Термічна обробка	Кислотна обробка	Лужна обробка	УФ + Фентон	УФ-опромінення	
PET	↑2,21	↓0,52	↓0,46	—	—	Pereira et al., 2025
HDPE	↓0,41	↑2,56	↑1,37	—	—	Pereira et al., 2025
LDPE	↓0,67	↓0,78	↓0,32	—	—	Pereira et al., 2025
PP	↑1,39 (з C)	—	—	↑27,2	↓0,10 (з C)	Alshammari et al., 2025; Lomwongsopon et al., 2025
PE	—	—	—	↑ 4,3	—	Lomwongsopon et al., 2025
PS	—	—	—	—	↑ 3,5	Yuan et al., 2025

Для PET, який належить до поліестерів, термічна обробка виявилася найефективнішою, оскільки збільшила швидкість деградації у 2,21 рази (Pereira et al., 2025). Такий результат пояснюється тим, що підвищення температури зменшує кристалічність і робить аморфні ділянки доступнішими для гідролітичних ферментів. Водночас хімічні методи, зокрема кислотна (↓0,52) та лужна (↓0,46) обробки (Pereira et al., 2025), продемонстрували інгібуючий ефект щодо подальшої біодеградації консорціумом. Зниження ефективності може бути зумовлене утворенням стійких проміжних продуктів

або інгібуванням мікробного консорціуму, хоча лужна обробка потенційно здатна прискорювати ферментативну деградацію поліестеру за умови спрямованого зменшення кристалічності.

Для поліолефінів, які отримують з нафти і газу, а саме поліетилену високої щільності (HDPE) та поліетилену низької щільності (LDPE) відзначено чіткі відмінності у реакції на обробку. Для HDPE найкращий результат забезпечила кислотна обробка, збільшивши ефективність деградації у 2,56 рази, тоді як термічна обробка, навпаки, істотно її знизила ($\downarrow 0,41$) (Pereira et al., 2025). На відміну від HDPE, для LDPE жоден з протестованих методів (термічний, кислотний, лужний) не виявив стимулюючої дії, а всі призвели до зниження ефективності біодеградації (коефіцієнти $\downarrow 0,67$ – $\downarrow 0,32$) (Pereira et al. 2025). Така закономірність, коли найвища деградація LDPE спостерігається у необробленого матеріалу, може бути пов'язана з тим, що консорціум був адаптований до вже природно окисленого, вивіреного поліетилену.

У випадку PP найбільший синергетичний ефект було відзначено для методів, що генерують високореактивні радикали. Обробка УФ+Фентон (комбінація УФ-опромінення та реагентів Фентона) здатна утворювати гідроксильні радикали. Вона підвищила ефективність біодеградації PP у 27,2 рази (Lomwongsopon et al., 2025). Така інтенсивна окислювальна модифікація, що супроводжується зменшенням кристалічності й товщини ламелярних кристалів, значно збільшує доступність полімеру для мікробної атаки. Для PE

аналогічна обробка спричинила підвищення ефективності у 4,3 рази (Lomwongsopon et al., 2025).

Показовим є порівняння високоокиснювальних підходів (Alshammari et al., 2025). Хоча УФ+Фентон продемонстрував високу ефективність, пряме УФ-опромінення PP спричинило різке зниження біодеградації ($\downarrow 0,10$ у середовищі з додаванням вуглецю). Незважаючи на інтенсивне окислення та підвищення карбонільного індексу, така обробка може викликати зшивання полімерних ланцюгів або формування продуктів, які важко метаболізуються грибними консорціумами. Натомість термічна обробка PP, хоча й виявляє менші зміни окисного характеру, сприяла збільшенню біодеградації у 1,39 рази (Alshammari et al., 2025), що, ймовірно, пояснюється фізичними змінами, які полегшують мікробний доступ до полімерної матриці.

Для PS попереднє УФ-опромінення підвищило ефективність деградації у 3,5 рази (Yuan et al., 2025). Утворення карбонільних ($C=O$) та гідроксильних ($C-OH$) груп унаслідок фотохімічного окислення активує $C-C$ зв'язки, полегшуючи подальшу ферментативно-опосередковану окиснювальну деполімеризацію.

3.3. Метааналіз ефективності біорозкладання LDPE/PE

Мета-аналіз охопив 15 спостережень з семи досліджень про біодеградацію LDPE/PE за допомогою мікроорганізмів (Merchant, 2025; Muangchinda, 2025; Xiong, 2025; Omidoyin, 2025; Dewi Lestari, 2025; John Paul Joseph, 2025; Kang, 2025). На основі вилучених з цих статей даних розраховано швидкість деградації як відсоток втрати ваги на день.

Модель випадкових ефектів показала середню швидкість деградації 0,1841 % на добу ($SE = 0,0489$). Це значення значуще ($p = 0,0002$), з 95 % довірчим інтервалом від 0,0883 до 0,2799. Отримані результати дозволяють стверджувати, що в середньому пластик розкладається мікроорганізмами пластисфери на 0,18 % щодня. Отже, мікроорганізми як окремо, так і ускладі мікробних консорціумів здатні розкласти LDPE/PE, але цей процес доволі повільний. Довірчий інтервал підтверджує реальність ефекту. Отримані нами результати метааналізу узгоджуються з літературними даними. Наприклад, у Merchant et al. (2025) описано 60 % втрати початкової маси зразка пластику за 120 діб, а у Kang et al. (2025) 16,2 % за 30 діб.

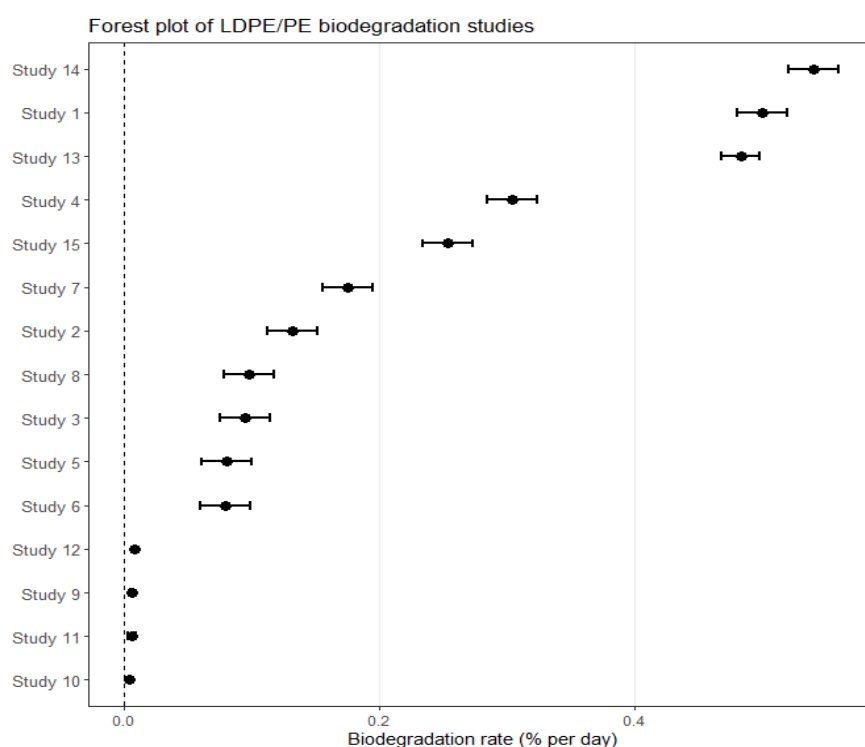


Рис. 3.4. Діаграма Forest plot на основі результатів спостережень з аналізованих досліджень

Встановлено високий рівень варіації між результатами різних досліджень: $\tau^2 = 0,0358$, $I^2 = 100,00\%$. Тест Q підтвердив це ($p < 0,0001$). Forest plot (рис. 3.4) показує результати кожного спостереження, а funnel plot (рис. 3.5) – можливу асиметрію.

Діаграма Forest plot (рис. 3.4) чітко показує відмінності між результатами, отриманими в аналізованих нами працях. Дослідження на

зображенні згруповані за зростанням швидкості деградації. Довірчі інтервали майже в усіх випадках виключають значення, близькі до нуля, що свідчить про достовірність оцінок.

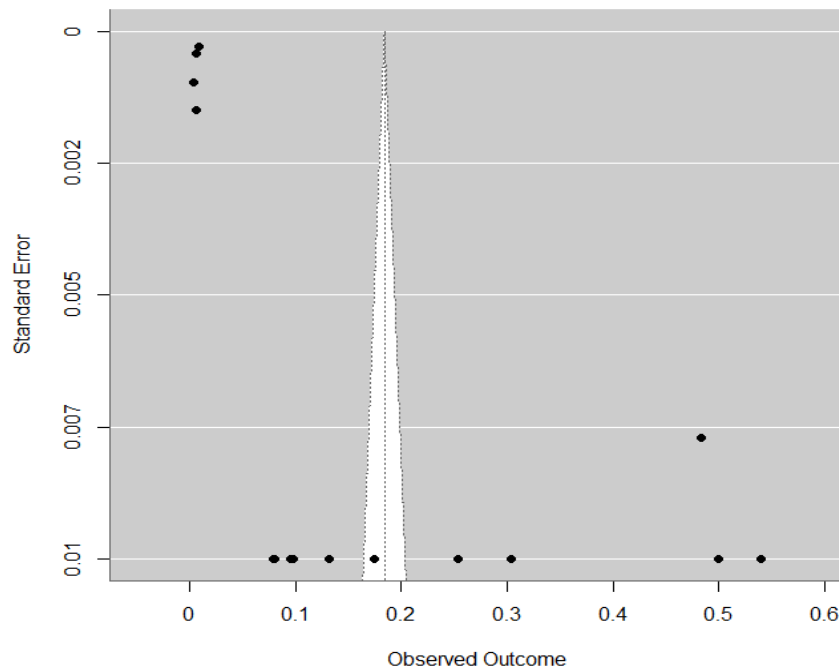


Рис. 3.5. Воронкова діаграма надійності результатів спостережень з аналізованих досліджень

Кожна точка на воронковій діаграмі (рис. 3.5) відповідає окремому спостереженню, а їх розподіл ілюструє варіацію ефектів (швидкості деградації) та похибок. Значна варіабельність між дослідженнями очікувана, враховуючи відмінності у типі полімеру, штаммах мікроорганізмів, умовах культивування та методах вимірювання масових втрат. Проте навіть за цієї гетерогенності загальний ефект моделей стабільний і позитивний, тобто більшість досліджень демонструють наявність, хоч і повільної, біодеградації поліетилену.

ВИСНОВКИ

1. На основі дослідження публікаційної активності щодо біодеградації пластику мікроорганізмами у науковій базі ScienceDirect встановлено стрімке зростання кількості наукових статей у 2023–2025 рр., більш ніж утричі порівняно з 2020 р. Лише в 2025 р. знайдено 1042 релевантні статті, які стали вихідною базою для подальших етапів метааналізу.
2. У пластисфері домінують бактерії (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Gordonia*, *Rhodococcus*) й гриби (*Aspergillus*, *Phanerochaete*), здатні розкласти широкий спектр полімерів, зокрема стійкі поліолефіни (PE, PP) і поліестери (PET, PU).
3. Головним фактором формування пластисфери є тип природного середовища, вплив якого переважає над типом полімеру і визначає доступність поживних речовин та вихідний пул колонізаторів.
4. Аналіз ефективності біодеградації виявив суттєву залежність результатів від хімічної структури полімерів. Найвищі показники біотрансформації демонструє PVC, де процес дегалогенації досягає 87,6–100%. Для PP характерна значна варіативність розкладу (2,5–35%), що вказує на чутливість цього процесу до зовнішніх умов. Порівняння поліетиленів підтверджує роль кристалічності як лімітуючого фактору: LDPE деградує втричі ефективніше (19,44%), ніж стійкий HDPE (6,60%).
5. Ефективність біодеградації залежить від попередньої обробки, яка є специфічною для кожного типу пластику. Максимальний приріст деструкції забезпечили: системи УФ+Фентон для PP (ефективність зросла у 27,2 рази), кислотна обробка для HDPE (2,56 рази) та термічна для PET (2,21 рази). Водночас для LDPE будь-який фізико-хімічний вплив лише гальмував процес.
6. Метааналіз показав, що біодеструкція поліетилену є повільною (0,18%/добу), але суттєво прискорюється попереднім окисненням та селекцією штамів. Це демонструє як потенціал, так і технологічні обмеження біоре mediaції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Міністерство освіти і науки України. (2024, 31 грудня). Методичні рекомендації щодо управління науковими даними. <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/nauka/2024/12/31/metod-rekomendatsiyi-shchodo-upravlinnya-naukovymy-danymy-31-12-2024.pdf>
2. Яценко, Л. О., & Леснікова, М. В. (2015). Методологічні основи мета-аналізу на прикладі результатів клінічних досліджень. *Статистика України*, (4), 36-45.
3. Abelouah, M. R., Idbella, M., Nouj, N., Ben-Haddad, M., Hajji, S., Ouهدdou, M., Ourouh, J., Iacomino, G., El Haouti, R., Barra, I., Abou Oualid, J., Bonanomi, G., Banni, M., & Ait Alla, A. (2025). Marine plastic exposure triggers rapid recruitment of plastic-degrading bacteria and accelerates polymer-specific transformations. *Journal of Hazardous Materials*, 483, Article 137497. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.137497>
4. Alidoosti, F., Giyahchi, M., & Moghimi, H. (2025). Synergistic bioremediation: Fungal-bacterial partnership degrades LDPE microplastics twice as fast. *Environmental Pollution*, 370, Article 126019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126019>
5. Alshammari, A. M., Virk, P., Elsayim, R., Al-Otaibi, N. R., Alotaibi, S. A., D'souza, J. I., Fouad, D., & Al-Amri, M. M. (2025). A consortium of *Aspergillus* species biodegrades polypropylene plastic. *Environmental Pollution*, 386, Article 127179. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127179>
6. Amaral-Zettler, E. A., Zettler, L. A., & Mincer, T. J. (2020). The Plastisphere: A brave new microbial world. In C. B. F. G. S. G. D. P. K. H. (Eds.), *Microbial Ecology of the Oceans* (3rd ed., pp. 545–563). Wiley-Blackwell.
7. Andleeb, S., Munir, M., Ali, M. I., Imdad, K., Balachandar, R., Mani, R. R., Chandrasekaran, M., Jones, S., Radhakrishnan, A., Chang, S. W., & Ravindran, B. (2024). Biodegradation of polyvinyl chloride using vermibacteria under variable physicochemical conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 477, Article 135759. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135759>

8. Bansal, M., Santhiya, D., & Sharma, J. G. (2024). Simulated dump yard microbes drive significant biodegradation of polypropylene and polyvinyl chloride microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135406. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135406>
9. Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 364(1526), 1985-1998.
10. Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 364(1526), 1985-1998.
11. Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P. T., & Rothstein, H. R. (2021). Introduction to meta-analysis (2nd ed.). John Wiley & Sons.
12. Buron-Moles, G., Vandenbossche, V., Gorret, N., Santonja-Blasco, L., González-Aranda, T., Cameleyre, X., & Guillouet, S. (2024). Biodegradation of pre-treated low-density polyethylene (LDPE) by *Yarrowia lipolytica* determined by oxidation and molecular weight reduction. *Chemosphere*, 367, Article 143306. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143306>
13. Cabiglieri, S. B., Gaudio, D., Chelazzi, D., Conti, L., Muzzi, B., Cantagalli, D., Cincinelli, A., Tegli, S., Jenkins, A., & Martellini, T. (2024). Isolation of a novel microplastic-degrading bacterial strain: a promising agent for low-density polyethylene remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135400. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135400>
14. Cai, Z., Li, M., Zhu, Z., Wang, X., Huang, Y., Li, T., Gong, H., & Yan, M. (2023). Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors. *Microorganisms*, 11(7), 1661.
15. Carrillo-Barragan, P., Cassola, G. E., & Burkhardt-Holm, P. (2024). Microbial colonisation of polyethylene in offshore marine environments: Insights from

- the Southern and South Atlantic Oceans. *Environmental Pollution*, 367, Article 125633. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125633>
16. Choonut, A., Wongfaed, N., Wongthong, L., Poolpol, A., Chaikitkaew, S., Sittijunda, S., & Reungsang, A. (2024). Microbial degradation of polypropylene microplastics and concomitant polyhydroxybutyrate production: An integrated bioremediation approach with metagenomic insights. *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135403>
 17. Corcoran, P. L., O’Riordan, I., & Duffy, B. (2025). Microplastic biofilms as potential hotspots for plastic biodegradation and nitrogen cycling: a metagenomic perspective. *FEMS Microbiology Ecology*, 101(5), fiae035.
 18. Coughlin, S. A., McFall, A., Kelly, S. A., & Megaw, J. (2025). Polyolefin colonization and partial degradation by *Gordonia* sp., and *Arthrobacter* sp. isolated from wetlands and compost. *Chemosphere*, 374, Article 145322. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.145322>
 19. Danso, D., Chow, J., & Streit, W. R. (2019). Plastics: Environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(12), 5045–5058.
 20. Dhanraj, N. D., Sreelakshmi, U. P., Sneha, P., & Jisha, M. S. (2023). A mechanistic insight into polyethylene degradation by *Bacillus* sp. and, *Lysinibacillus* sp. from mangrove soil. *Scientific Reports*, 13(1), Article 19749. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47137-0>
 21. Gambarini, V., Pavlov, N., Young, P., Dawes, S., Auffret, A., Kingsbury, J. M., Donaldson, L. A., Smith, D. A., Weaver, L., Pantos, O., Handley, K. M., & Lear, G. (2024). Molecular mechanisms of plastic biodegradation by the fungus *Clonostachys rosea*. *Environmental Pollution*, 346, Article 123490. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123490>
 22. Giyahchi, M., & Moghimi, H. (2025). Sustainable solution for microplastic removal: Sequential biodegradation and detoxification of polyethylene

- terephthalate microplastics by two natural microbial consortia. *Environmental Pollution*, 371, Article 126038. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126038>
23. Goudriaan, M., Ndhlovu, R. T., Brouwer, M., Vreugdenhil, S., van der Meer, M. T. J., & Niemann, H. (2025). Degradation and habitat-dependent colonization of plastics in Caribbean coastal waters and sediments by bacterial communities. *Environmental Pollution*, 370, Article 125958. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125958>
 24. Gurevitch, J., Koricheva, J., Nakagawa, S., & Stewart, G. (2018). Meta-analysis and the science of research synthesis. *Nature*, 555(7695), 175–182.
 25. Guruge, K. S., Goswami, P., Kanda, K., Abeynayaka, A., Kumagai, M., Watanabe, M., & Tamamura-Andoh, Y. (2024). Plastiome: Plastisphere-enriched mobile resistome in aquatic environments. *Journal of Hazardous Materials*, 471, 134353.
 26. Higgins, J. P. T., Thompson, S. G., Deeks, J. J., & Altman, D. G. (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ*, 327(7414), 557–560.
 27. Hu, R., Song, L., Liu, H., Tao, H., Shi, Y., Liu, Q., Zhang, H., & Qi, Y. (2025). The degradation of polyethylene by soil microbial communities was significantly enhanced through the Fe³⁺-induced Fenton-like reaction. *Journal of Hazardous Materials*, 484, Article 136458. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136458>
 28. Jacquin, J., Cheng, J., Odobel, C., Pandin, C., Conan, P., Pujo-Pay, M., Barbe, V., Meistertzheim, A.-L., & Ghiglione, J.-F. (2019). Microbial Ecotoxicology of Marine Plastic Debris: A Review on Colonization and Biodegradation by the “Plastisphere”. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 865.
 29. Jia, J., Liu, Q., Zhao, E., Li, X., Xiong, X., & Wu, C. (2024). Biofilm formation on microplastics and interactions with antibiotics, antibiotic resistance genes and pathogens in aquatic environment. *Eco & Environmental Health*, 3(4), 516–528.
 30. Jiang, Y., Fu, B., Wu, W.-M., Zhou, C., Khan, A., Zhang, G., Salama, E.-S., Jeon, B.-H., Alreshidi, M. A., Li, C., Han, H., & Li, X. (2025). Soil microbes

- in the Tibetan Plateau degrade polyvinyl chloride and harbor novel dehalogenase SerB. *Environmental Pollution*, 371, Article 126079. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126079>
31. Joseph, S. J. P., Jayashree, K., Boopathi, S. K., Rejoy P, A. P., Poornima, S., & Subramani, N. (2024). Ecological dynamics and biodegradation potential of freshwater epiplastic microalgae: A sustainable solution for plastic waste management. *Journal of Hazardous Materials*, 477, Article 135790. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135790>
 32. Joshi, G., Goswami, P., Jha, D. K., Vinithkumar, N. V., & Dharani, G. (2024). Microplastics under siege: Biofilm-forming marine bacteria from the microplastisphere and their role in plastic degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 469, Article 133854. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133854>
 33. Kang, Z., Li, N., Wang, C., Yue, J., & Yu, H. (2024). Biodegradation of low-density polyethylene by a novel *Paenarthrobacter* sp. PE0901 from oilfield soil: Isolation, characterization, and degradation mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, 465, Article 133276. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133276>
 34. Khatua, S., Simal-Gándara, J., & Acharya, K. (2023). Myco-remediation of plastic pollution: current knowledge and future prospects. *Biodegradation*, 35(3), 249–279.
 35. Kirstein, I. V., Kirmizi, S., Wichels, A., D'Souza, M., Gwa, R. K., & Lucas, C. H. (2016). Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on marine plastic debris. *Marine Environmental Research*, 120, 1–8.
 36. Kong, T., Sun, X., Gao, P., Huang, W., Guan, X., Xu, Z., Li, B., & Sun, W. (2024). Investigation of the ecological roles of the plastisphere microbiome in metal-contaminated river sediments: elucidation of their metabolic versatilities for plastics mineralization and metal resistance. *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135424. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135424>
 37. Lestari, S. D., Hatmanti, A., Hidayati, N. V., Kurnia, A., Afianti, N. F., Kristanti, R. A., Endrotjahjo, E., & Manik, H. (2024). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic by actinomycetes isolated from

- Balikpapan coastal sediment, Indonesia. *Environmental Research*, 245, Article 118029. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118029>
38. Lesuis, C., Niemann, H., Kienhuis, M. V. M., van der Meer, M. T. J., Vielfaure, H., Polerecky, L., & Vaksmaa, A. (2025). Mineralization of photodegraded polyethylene by the marine-derived fungus *Aspergillus terreus*. *Environmental Pollution*, 371, Article 126048. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126048>
 39. Li, A., Yuan, F., Li, L., Gu, J., Zhang, Y., Li, F., Tang, T., & Liu, F. (2025). Interactions between nanoplastics and *Tetrahymena thermophila*: Low toxicity vs. potential biodegradation. *Environmental Pollution*, 370, Article 126047. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126047>
 40. Li, L., Guo, Z., Guo, X., Dong, D., Fan, T., Yao, L., Zha, Y., Kong, J., Dai, Y., & Pan, T. (2025). *Phanerochaete chrysosporium* hyphae bio-crack, endocytose and metabolize plastic films. *Environmental Pollution*, 370, Article 126133. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126133>
 41. Li, Q., Li, H., Tian, L., Wang, Y., Ouyang, Z., Li, L., & Mao, Y. (2024). Genomic insights and metabolic pathways of an enriched bacterial community capable of degrading polyethylene. *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135404. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135404>
 42. Lomwongsopon, P., Monje Martínez, B., Barranca Jiménez, A., Bardenstein, A. L., Kusano, Y., Christiansen, J. de C., & Varrone, C. (2024). Enhancing biodegradation of polyolefins and real mixed plastic waste by combination of pretreatment and mixed microbial consortia. *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135402. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135402>
 43. Magana-Montiel, N., Muriel-Millan, L. F., Rojas-Vargas, J., Millan-López, K. S., Loza-Tavera, H., Schnabel-Peraza, D., Pena-Malacara, C. F., Gracia, A., & Pardo-Lopez, L. (2025). A marine bacterial strain with polyurethane-degrading activity, a potential for plastic waste control in the oceans. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 300, Article 120807. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.120807>

44. Mamtimin, T., Han, H., Khan, A., Feng, P., Zhang, Q., Ma, X., Fang, Y., Liu, P., Kulshrestha, S., Shigaki, T., & Li, X. (2023). Gut microbiome of mealworms (*Tenebrio molitor* larvae) show similar responses to polystyrene and corn straw diets. *Microbiome*, 11, Article 98.
45. Merchant, M., Mande, S. S., & Sar, P. (2024). Microbial community enrichment and transition in landfill for the biotransformation of unpretreated low-density polyethylene (LDPE) under aerobic and anaerobic conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135405. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135405>
46. Mori-Bazzano, L., Nguyen, N. H. A., Sevcu, A., Riha, J., Fu, T., Slaveykova, V. I., & Ibelings, B. W. (2024). Plastic degradation in Lake Geneva: Influence of depth, seasonal shifts, and bacterial community dynamics. *Environmental Pollution*, 346, Article 123498. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123498>
47. Muangchinda, C., Naloka, K., & Pinyakong, O. (2024). Enhanced soil biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by a synthetic bacterial consortium: Performance, mechanisms, and community dynamics. *Journal of Hazardous Materials*, 476, Article 135451. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135451>
48. Mulky, L., Valiaparampil, J. G., & Somashekara, D. (2025). Plastisphere - A new habitat of microbial community: Composition, structure and ecological consequences. *Sustainable Environment*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2025.2516898>
49. Nakagawa, S., Yang, Y., Macartney, E. L., Spake, R., & Lagisz, M. (2023). Quantitative evidence synthesis: a practical guide on meta-analysis, meta-regression, and publication bias tests for environmental sciences. *Environmental Evidence*, 12(1), 8.
50. Newrick, B. A., Valdés, D., Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. (2025). Enhanced biodegradation of high-density polyethylene microplastics: Study of bacterial efficiency and process parameters. *Journal of Environmental Management*, 374, Article 121528. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121528>

51. Okal, E. J., Zhou, J., Wu, Y., Zhong, T., Tang, Y., Sun, Z., Xu, R., Hu, Y., Hu, N., Li, J., Karunarathna, S. C., Mortimer, P. E., Iqbal, S., Yu, D., Xu, J., & Gui, H. (2025). Unveiling fungal degradation pathways for polyurethane and polyethylene through enrichment cultures and metabolic analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 483, Article 136284. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136284>
52. Omidoyin, K. C., Hwang, S. K., Hong, J.-K., & Jho, E. H. (2024). Biodegradation of low-density polyethylene microplastics by *Fusarium* and *Penicillium* strains isolated from agricultural soil mulched with polyethylene film. *Journal of Hazardous Materials*, 469, Article 133857. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133857>
53. Paulraj, V. D., & Narayanasamy, S. (2024). Biofilm-mediated low-density polyethylene degradation by *Gordonia* sp. isolated from plastic contaminated municipal waste dumping site: An optimization study. *Journal of Environmental Management*, 373, Article 122114. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122114>
54. Pereira, S., Rubina, M., Roga, A., Selga, T., Skinderskis, E., Gudrā, D., Kalniņa, I., Vonda, K., Fridmanis, D., & Muter, O. (2024). Evaluation of functional capacity and plastic-degrading potential of *Bacillus* spp. and other bacteria derived from the Getliņi landfill (Latvia). *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135401. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135401>
55. Pinnell, L. J., & Turner, S. (2019). Shotgun metagenomics reveals the benthic microbial community response to plastic and bioplastic in a coastal Marine Environment. *Environmental Microbiology*, 21(11), 4302–4316.
56. Qiu, Q., Sun, X., Li, H., Zhang, F., Zhou, D., Tian, K., Zhang, X., & Huo, H. (2024). Biodegradation of polystyrene and its mechanisms driven by a customized lignin-degrading microbial consortium and degrading bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 469, Article 133856. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133856>

57. Ren, G.-C., Pang, A.-M., Gao, Y., Wu, S.-X., Ge, Z.-Q., Zhang, T. F., Wanasinghe, D. N., Khan, S., Mortimer, P. E., Xu, J., & Gui, H. (2021). Polyurethane-degrading fungi from soils contaminated with rocket propellant: isolation, enzyme production, and degradation ability. *Studies in Fungi*, 6(1), 224–239. <https://doi.org/10.5943/sif/6/1/15>
58. Rummel, C. D., Lechtenfeld, O. J., Kallies, R., Benke, A., Herzsprung, P., Rynek, R., Wagner, S., Potthoff, A., Jahnke, A., & Schmitt-Jansen, M. (2021). Conditioning film and early biofilm succession on plastic surfaces. *Environmental Science & Technology*, 55(16), 11006–11018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07875>
59. Schroeder, N. L. (2024). Simple meta-analysis. Available from https://github.com/noah-schroeder/simple_meta-analysis/
60. Senior, A. M., Grueber, C. E., Kamiya, T., Lagisz, M., O'Dwyer, K., Santos, E. S. A., & Nakagawa, S. (2016). Heterogeneity in ecological and evolutionary meta-analyses: Its magnitude and implications. *Ecology*, 97(12), 3293–3299
61. Senior, A. M., Grueber, C. E., Kamiya, T., Lagisz, M., O'Dwyer, K., Santos, E. S. A., & Nakagawa, S. (2016). Heterogeneity in ecological and evolutionary meta-analyses: Its magnitude and implications. *Ecology*, 97(12), 3293–3299.
62. Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246–265.
63. Shi, X., Chen, Z., Wei, W., Chen, J., & Ni, B.-J. (2023). Toxicity of micro/nanoplastics in the environment: Roles of plastisphere and eco-corona. *Soil & Environmental Health*, 1(1), 100002. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100002>
64. Shimao, M. (2001). Biodegradation of plastics. *Current Opinion in Biotechnology*, 12(3), 242–247.
65. Şimşek Uygun, B., & Malkoç, S. (2024). Microplastics biodegradation by *Aspergillus flavus* and *Aspergillus versicolor*. *Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(1), 5–9.

66. Su, Y., Lei, J., Diao, X., Peng, L., Yin, L., Qin, Y., Zhang, W., & Li, P. (2025). Microplastic aging and plastisphere succession in mangrove sediments: Mechanisms, microbial interactions, and degradation potential. *Environmental Pollution*, 370, Article 126040. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126040>
67. Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., & Tosi, S. (2022). Fungal enzymes involved in plastics biodegradation. *Microorganisms*, 10(6), 1180.
68. Turkey, A., & Upadhyay, L. S. B. (2024). Introducing the LDPE degrading microbes of sedimentary systems: from dumpsite to laboratory. *Journal of Environmental Management*, 369, Article 122292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122292>
69. Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., & Aiba, S. (2009). Biodegradability of plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(9), 3722–3742.
70. Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., Kamionka, E., Desrousseaux, M.-L., Texier, H., Gavalda, S., Cot, M., Guémard, E., Dalibey, M., Nomme, J., Cioci, G., Barbe, S., Chateau, M., André, I., & Duquesne, S. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216–219.
71. Tousizadeh, S., Mohaghegh Dolatabadi, N., Mohammadi-Moghadam, F., Bahador, S. M., Kazemian Talkhooncheh, A., & Mousavi, M. S. (2024). Evaluation of plastic biodegradation with three strains of *Bacillus subtilis* ATCC6051, *Bacillus cereus* ATCC 11778, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923. *Journal of Hazardous Materials*, 475, Article 135320. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135320>
72. Urbanek, A. K., Rymowicz, W., & Mironczuk, A. M. (2018). Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(18), 7669–7678.
73. Ventura, E., Marín, A., Gámez-Pérez, J., et al. (2024). Recent advances in the relationships between biofilms and microplastics in natural environments. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 40, 220.

74. Wang, H., Xu, K., Wang, J., Feng, C., Chen, Y., Shi, J., Ding, Y., Deng, C., & Liu, X. (2023). Microplastic biofilm: An important microniche that may accelerate the spread of antibiotic resistance genes via natural transformation. *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132085.
75. Wang, L., Huang, J., Xu, J., Li, X., Ma, H., Qian, X., & Abolfathi, S. (2024). Comparative analysis of microbial colonization and degradation of low-density (LDPE) and high-density polyethylene (HDPE) microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 477, Article 135678. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135678>
76. Xiong, Z., Chen, X., Zou, Z., Peng, L., Zou, L., Liu, B., & Li, Q. (2025). Improving efficiency of bacterial degradation of polyethylene microplastics using atmospheric and room temperature plasma mutagenesis. *Journal of Hazardous Materials*, 483, Article 137453. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.137453>
77. Xue, H., Chen, X., Jiang, Z., Lei, J., Zhou, J., Dong, W., Li, Z., Hu, G., & Cui, Z. (2024). Biodegradation of polypropylene by *Bacillus cereus* PP-5 isolated from waste landfill. *Journal of Hazardous Materials*, 469, Article 133983. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133983>
78. Yoshida, S., Hiraga, K., Takeyama, H., Katayama, T., & Ohtani, N. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196–1199.
79. Yuan, Y., Su, T., Zheng, Y., Liu, B., Han, Y., Wang, Z., Liang, Q., Dian, L., & Qi, Q. (2024). Bacterial co-cultivation for the degradation of polystyrene plastics. *Environmental Pollution*, 348, Article 123714. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123714>
80. Zettler, L. A., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, E. A. (2013). Life in the "Plastisphere": Microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137–7146.

81. Zettler, L. A., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, E. A. (2023). The Plastisphere at ten: Understanding the ecology and evolution of a novel human-made habitat. *Microbiology Spectrum*, 11(4), e0030523.
82. Zhai, X., Zhang, X., & Yu, M. (2023). Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review. *Frontiers in Microbiology*, 14, Article 1127308.
83. Zidannajiyah, A., Ayuningrum, D., & Sabdaningsih, A. (2025). Identification of Tunicates-associated bacteria (Class: Ascidiacea) from Karimunjawa islands with plastic-degrading activity. *Environmental Pollution*, 370, Article 125965. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125965>
84. Zrimec, J., Lapanje, A., & Kumar, V. (2021). Plastic-Degrading Potential across the Global Microbiome Correlates with Recent Pollution Trends. *mBio*, 12(3), e02155-21.

ДОДАТКИ

Документація робочого процесу

Таблиця А.1

Протокол пошуку першоджерел у базі ScienceDirect

Конфігурація пошукового запиту	Кількість літературних джерел
plastic biodegradation" AND (microorganism OR bacteria OR fungi)	31179
("plastic biodegradation" OR "polymer degradation") AND ("degradation rate" OR "mass loss" OR "weight loss") AND ("bacteria" OR "fungi") AND ("laboratory" OR "experiment")	3099
("plastic biodegradation" OR "polymer degradation") AND ("degradation rate" OR "mass loss" OR "weight loss") AND ("bacteria" OR "fungi") AND ("laboratory" OR "experiment") Фільтр «Research article»	1812
("plastic biodegradation" OR "polymer degradation") AND ("degradation rate" OR "mass loss" OR "weight loss") AND ("bacteria" OR "fungi") AND ("laboratory" OR "experiment") Фільтри «Research article» + «2020» + «2021» + «2022» + «2023» + «2024» + «2025»	1042 із них за 2020 р. – 80 2021 р. – 130 2022 р. – 131 2023 р. – 174 2024 р. – 242 2025 р. – 285
("plastic biodegradation" OR "polymer degradation") AND ("degradation rate" OR "mass loss" OR "weight loss") AND (bacteria OR fungi) AND (laboratory OR experiment) Фільтри «Research article» + «2025»	285

zotero

Web Library Groups Documentation Forums Get Involved a.zhuk ▾

Q ▾ | Title, Creator, Year

Upgrade Storage

My Library

Group Libraries

Biodegradation-meta_analysis

Trash

Title	Creator	D...
A consortium of Aspergillus species biodegrades polypropylene plastic	Alsha...	2...
A dual approach using UV irradiation and subcritical water extraction for enhanced PLA waste degrad...	Prata...	2...
A marine bacterial strain with polyurethane-degrading activity, a potential for plastic waste control in ...	Maga...	2...
A mechanistic insight into polyethylene degradation by Bacillus sp. and, Lysinibacillus sp. from mangr...	Dhanr...	2...
A novel biodegradable active packaging based on PHB/PCL for controlling Listeria monocytogenes in...	Aguer...	2...
A novel Gordonia sp. PS3 isolated from the gut of Galleria mellonella larvae: Mechanism of polystyren...	Xu et ...	2...
A novel plastic-degrading bacteria isolated from farmland soil utilizes non-sole carbon sources to enh...	Chen ...	2...
A novel ternary polymer/ β -TCP composite microspheres with polydopamine-encapsulated nano zinc ...	Zhan...	2...
A screening method for polyester films-degrading microorganisms and enzymes	Urbeli...	2...
Accelerating biodegradation efficiency of low-density polyethylene and its hazardous dissolved organ...	Uddin...	2...
Addition of inorganic nitrogen significantly increases the real and apparent priming effects of polyeth...	Brow...	2...
Advances in ultrasound-assisted drug delivery and clinical application	Lai et ...	2...
Aerobic biodegradation of 3D printed biocomposites containing polylactic acid and industrial residua...	Helao...	2...
Aged polyethylene terephthalate (PET) by photodegradation can affect the next generation of expose...	Oscar...	2...
Alginate-based nanocomposite incorporating chitosan nanoparticles: A dual-drug delivery system for...	Mous...	2...

Info Notes Tags Attachments Related

Item Type Journal Article

Title A novel Gordonia sp. PS3 isolated from the gut of Galleria mellonella larvae: Mechanism of polystyrene biodegradation and environmental toxicological evaluation

Author Xu, Luhui

Author An, Xuejiao

Author Jiang, Huoyong

Author Pei, Rui

Author Li, Zelin

Author Wen, Jiehao

Author Pi, Wenjie

Author Zhang, Qinghua

Publication Journal of Hazardous Materials

Volume 488

Issue

Рис. А.1. Знімок імпортованого у сервіс Zotero бібліографічного переліку першоджерел на етапі ідентифікації

	A	B	C	G
1	Publicati	Author	Title	Abstract Note
2	2025	Alshammari, Asma Mudhahi; Virk, I	A consortium of <i>Aspergillus</i> species biodegrades polypropylene plastic	In recent times, there has been increased worldwide awareness on the grave is
3	2025	Magaña-Montiel, Nallely; Muriel-M	A marine bacterial strain with polyurethane-degrading activity, a potential for plastic waste control in the oceans	Plastic pollution represents a significant global challenge, and diverse strategie
4	2025	Dhanraj, N. D.; Sreelakshmi, U. P.; S	A mechanistic insight into polyethylene degradation by <i>Bacillus</i> sp. and <i>Lysinibacillus</i> sp. from mangrove soil	This study aims to establish a sustainable method for plastic remediation, parti
5	2025	Yuan, Yingbo; Su, Tianyuan; Zheng,	Bacterial co-cultivation for the degradation of polystyrene plastics	Polystyrene (PS) is a polyolefin plastic that is used extensively in food packaging
6	2025	Lestari, Sinda Dewi; Hatmanti, Aria	Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic by actinomycetes isolated from Balikpapan coastal sediment, Indonesia	Polyethylene plastics are a persistent pollutant due to their distribution, availab
7	2025	Kang, Zhichao; Li, Nannan; Wang, C	Biodegradation of low-density polyethylene by a novel <i>Paenarthrobacter</i> sp. PE0901 from oilfield soil: Isolation, characterization, and degradation mechanism	Global polyethylene contamination poses an increasing environmental threat to
8	2025	Omidoyin, Kehinde Caleb; Hwang, S	Biodegradation of low-density polyethylene microplastics by <i>Fusarium</i> and <i>Penicillium</i> strains isolated from agricultural soil mulched with polyethylene film	The presence of low-density polyethylene (LDPE) in agricultural soils poses sign
9	2025	Xue, Huizhen; Chen, Xue; Jiang, Zhi	Biodegradation of polypropylene by <i>Bacillus cereus</i> PP-5 isolated from waste landfill	Waste polypropylene (PP) plastic has caused serious environmental pollution, a
10	2025	Qiu, Qing; Sun, Xuejian; Li, Han; Zh	Biodegradation of polystyrene and its mechanisms driven by a customized lignin-degrading microbial consortium and degrading bacteria	Polystyrene (PS), being resistant to biodegradation, poses a significant environr
11	2025	Andleeb, Saiqa; Munir, Muqaddas;	Biodegradation of polyvinyl chloride using vermibacteria under variable physicochemical conditions	Plastic has a significant hazard to the environment, but its impact could be miti
12	2025	Buron-Moles, G.; Vandenbossche, V	Biodegradation of pre-treated low-density polyethylene (LDPE) by <i>Yarrowia lipolytica</i> determined by oxidation and molecular weight reduction	Millions of metric tonnes of plastic waste are generated every year, with a mini
13	2025	Paulraj, Vennila Devi; Narayanasam	Biofilm-mediated low-density polyethylene degradation by <i>Gordonia</i> sp. isolated from plastic contaminated municipal waste dumping site: An optimization study	This study focuses on Low-Density polyethylene (LDPE) degradation through bio
14	2025	Wang, Luming; Huang, Juan; Xu, Jin	Comparative analysis of microbial colonization and degradation of low-density (LDPE) and high-density polyethylene (HDPE) microplastics	The global spread of microplastics (MPs) poses significant environmental risks,
15	2025	Goudriaan, Maaïke; Ndhlovu, Rach	Degradation and habitat-dependent colonization of plastics in Caribbean coastal waters and sediments by bacterial communities	This study investigates microbial colonization of plastics in Caribbean coastal w
16	2025	Joseph, Sagaya John Paul; K, Jayash	Ecological dynamics and biodegradation potential of freshwater epiplastic microalgae: A sustainable solution for plastic waste management	Plastic pollution in freshwater ecosystems poses critical threats to biodiversity,
17	2025	Newrick, Bess A.; Valdés, David; Lac	Enhanced biodegradation of high-density polyethylene microplastics: Study of bacterial efficiency and process parameters	As global microplastic (MP) pollution intensifies, sustainable and effective reme
18	2025	Muangchinda, Chanokporn; Naloka	Enhanced soil biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by a synthetic bacterial consortium: Performance, mechanisms, and community dynamics	Low-density polyethylene (LDPE) is a persistent plastic that significantly contrib
19	2025	Lomwongsopon, Passanun; Martín	Enhancing biodegradation of polyolefins and real mixed plastic waste by combination of pretreatment and mixed microbial consortia	Polyolefins (PO)1 are the most common consumer plastics, constituting about 1

Рис. А.2. Фрагмент сформованої бази першоджерел, після етапу скринінгу

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	№	Автор, рік	Журнал	Тип пластику	Група мікроорганізмів	Вид/рід	Умови експерименту	Попередня обробка	Середовище
2	1	Alshammari et al., 2025	Environmental Pollution	Поліпропілен (PP)	Бактерії	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus oryzae</i>	25°C; pH 7.0; постійне струшування 160 rpm; термічна обробка (100 °C на 10 хв) або УФ (254 нм на 24 год).	Термічна обробка, обробка УФ і контроль без обробки	Лабораторна культура середовищі Чапека в різних варіантах із та без додавання вуглецю
3	2	Magaña-Montiel et al., 2025	Marine Pollution Bulletin	Поліуретан (PU) Impranil, Поліакрил (PA)	Бактерії	<i>Stutzerimonas frequens</i>	30 °C; pH 7.6; постійне струшування 180 rpm; темрява	Відсутня	Мікрокосм Gulf of Mexico морською водою і додаванням вуглецю
4	3	Dhanraj et al., 2025	Process Biochemistry	Поліетилен низької щільності (LDPE)	Бактерії	<i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Lysinibacillus boronitolerans</i>	30°C; постійне струшування	Хіміко-механічна (розчинення + подрібнення)	Мінеральне сольове середовище PE як джерелом вуглецю
5	4	Yingbo Yuan et al., 2025	Engineering Microbiology	Полістирол (PS)	Бактерії	<i>Raoultella</i> sp., <i>Pseudomonas putida</i>	Спільне культивування; T=30°C; Співвідношення інокуляції 1:1	УФ-опромінення протягом 20 днів	Середовище Лурії-Бертані (LB) - ПС плівка (25 мг на 50 мл)
6	5	Sinda Dewi Lestari et al., 2025	Marine Pollution Bulletin	Поліетилен низької щільності (LDPE)	Актиноміцети	Консорціум (NACTB22–4, NACTB22–8, NACTB22–9)	Інкубація	Відсутня	Мінімальне середовище (LDPE як джерело вуглецю)
7	6	Zhichao Kang et al., 2025	Journal of Environmental Chemical Engineering	Поліетилен низької щільності (LDPE)	Бактерії	<i>Paenarthrobacter</i> sp.	Рідка культура, 30 днів, 1,0×10 ⁵ CFU/mL–1	Відсутня	Мінімальне сольове середовище (MSM)
8	7	Kehinde Caleb Omidoyin et al., 2025	Journal of Environmental Management	Поліетилен низької щільності (LDPE)	Гриб	<i>Penicillium</i> sp.	Рідка культура (Bushnell Naas)	Відсутня	Мінеральне сольове середовище (MSM)
9	8	Huizhen Xue et al., 2025	Ecotoxicology and Environmental Safety	Поліпропілен (PP)	Бактерії	<i>Bacillus cereus</i>	Інкубація	Відсутня	Мінімальне середовище

Рис. А.3. Фрагмент масиву вторинних даних, сформованих на основі опрацьованих літературних джерел

Код R, використаний для метааналізу
(побудовано і вдосконалено за допомогою ChatGPT)

```
library(metafor)
library(ggplot2)
library(dplyr)

# Data + all calculations
meta_data <- data.frame(
  study = c("Merchant_2025", "Muangchinda_2025_max", "Muangchinda_2025_min",
    "Xiong_2025", "Omidoyin_2025_F_oxysporum", "Omidoyin_2025_F_solani",
    "Omidoyin_2025_Penicillium_sp", "Omidoyin_2025_P_olsonii",
    "Dewi_2025_22-4", "Dewi_2025_22-8", "Dewi_2025_22-9", "Dewi_2025_consortium",
    "JohnPaul_2025", "Kang_2025_film", "Kang_2025_MPs"),
  total_percent = c(60, 7.88, 5.70, 15.21, 2.40, 2.36, 5.25, 2.94,
    0.3522, 0.2565, 0.3486, 0.5075, 14.49, 16.2, 7.6),
  sd = c(NA, NA, NA, NA, NA, NA, NA, NA, NA, 0.0440, 0.1019, 0.1552, 0.0304, 0.40, NA, NA),
  days = c(120, 60, 60, 50, 30, 30, 30, 30, 60, 60, 60, 60, 30, 30, 30),
  n = 3
) %>%
mutate(
  yi = total_percent / days,
  vi = ifelse(is.na(sd), 1e-4, (sd^2 / n) / days^2),
  SE = sqrt(vi),
  CI_L = yi - 1.96 * SE,
  CI_U = yi + 1.96 * SE,
  Study = factor(paste("Study", row_number()))
) %>%
arrange(yi) %>%
mutate(Study = factor(Study, levels = Study))

# Model
res <- rma(yi, vi, data = meta_data, method = "REML")

# X-limits
xlim <- range(c(meta_data$CI_L, meta_data$CI_U)) + c(-0.002, 0.002)

# Forest plot
ggplot(meta_data, aes(Study, yi)) +
  geom_point(size = 3) +
  geom_errorbarh(aes(xmin = CI_L, xmax = CI_U), height = .2, linewidth = .8) +
  geom_vline(xintercept = 0, linetype = "dashed") +
  coord_cartesian(xlim = xlim) +
  theme_bw() +
  theme(axis.title.y = element_blank(),
    panel.grid.major.y = element_blank(),
    panel.grid.minor = element_blank()) +
  xlab("Biodegradation rate (%/day)") +
  ggtitle("Forest plot of LDPE/PE biodegradation")

# Funnel plot
funnel(res)
```

Систематизовані вторинні дані щодо мешканців пластисфери

№	Тип пластику	Джерело зразка / Середовище	Група мікроорга нізмів	Ідентифіковані таксони (Рід/Вид)	Додаткова інформація	Автори дослідження
1	PP	N/A	Гриби	<i>Aspergillus niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>A. oryzae</i>	Чиста культура / Консорціум	Alshammari et al., 2025
2	PU	Морські води/осади (Мексиканська затока)	Бактерії	<i>Stutzerimonas frequens</i>	Чиста культура (Штам GOM2) (Pseudomonadota)	Magaña-Montiel et al., 2025
3	LDPE	Мангрові ґрунти (Індія)	Бактерії	<i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Lysinibacillus boronitolerans</i>	Чиста культура (Bacillota)	Dhanraj et al., 2025
4	PS	N/A	Бактерії	<i>Raoultella</i> sp., <i>Pseudomonas putida</i>	Чиста культура / Ко-культура (Штам DY2415, KT2440-ΔRBC) (Pseudomonadota)	Yuan et al., 2025

5	LDPE	Морські осади (Балікпапан, Індонезія)	Бактерії	N/A	Мікробний консорціум (Актиноміцети, Actinobacteriota, Ізоляти NACTB22–4, NACTB22–8, NACTB22–9)	Lestari et al., 2025
6	LDPE	Ґрунт (Нафтове родовище Дацін, Китай)	Бактерії	<i>Paenarthrobacter sp.</i>	Чиста культура (Ізолят PE0901) (Actinobacteriota)	Kang et al., 2025
7	LDPE	Сільськогосподарські ґрунти, забруднені PE	Гриби	<i>Fusarium oxysporum</i> , <i>F. solani</i> , <i>Penicillium sp.</i> , <i>P. olsonii</i>	Чиста культура (Штами FSB5, FSB4, FSB2, RN2) (Аскоміцети)	Omidoyin et al., 2025
8	PP	Звалище (Цзінсянь, Аньхой, Китай)	Бактерії	<i>Bacillus cereus</i>	Чиста культура (Ізолят PP-5) (Bacillota)	Xue et al., 2025
9	PS	Ділянки, багаті на лігнін-деградуючі бактерії	Бактерії	LQX-03, <i>Pseudomonas putida</i> Q1	Мікробний консорціум (Proteobacteria, Bacillota)	Qiu et al., 2025
10	PVC	Звалище	Бактерії	<i>Bacillus mycoides</i> , <i>B. megaterium</i> , <i>B. mojavensis</i> , <i>B. thuringiensis</i> , <i>B. paranthracis</i>	Чиста культура / Консорціум (Bacillota)	Andleeb et al., 2025
11	LDPE	Паливний бак літака	Гриби	<i>Yarrowia lipolytica</i>	Чиста культура (Дріжджі, Штам DSM 21,175)	Buron-Moles et al., 2025

12	LDPE	Муніципальне звалище (Ченнаї, Індія)	Бактерії	<i>Gordonia sp.</i>	Чиста культура (Ізолят VD24.SIMATS) (Actinobacteriota)	Paulraj et al., 2025
13	LDPE, HDPE	Агрогрунти (Нанкін, Китай)	Бактерії	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i> , <i>Bacillus proteolyticus</i>	Мікробний консорціум (Аналіз мікробної спільноти) (Включає: <i>Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteriota</i> , <i>Bacteroidota</i>)	Wang et al., 2025
14	PE, PP	Прибережні води/осади (Карибське море)	Бактерії	N/A	Мікробне угруповання (16S секвенування спільноти) (Філуми: <i>Proteobacteria</i> , <i>Bacteroidota</i>)	Goudriaan et al., 2025
15	PET, PP, LDPE, PS, HDPE, PVC	Прісноводні водойми (Ченнаї, Індія)	Мікробна рослинність	<i>Coccomyxa sp.</i>	Чиста культура / Консорціум (Включає Ціанобактерії: <i>Leptolyngbya</i> , <i>Chroococcidiopsis</i>)	Joseph et al., 2025
16	HDPE	N/A	Бактерії	<i>Comamonas testosteroni</i> , <i>Bacillus firmus</i> , <i>Paenibacillus macquariensis</i>	Чиста культура (Штами NCIMB 8955, NCTC 10335, NCTC 10419) (<i>Pseudomonadota</i> , <i>Bacillota</i>)	Newrick et al., 2025
17	LDPE	Сільськогосподарське поле (Чіангмай, Таїланд)	Бактерії	<i>Gordonia sihwensis</i> , <i>Amycolatopsis thermoflava</i> , <i>Mesorhizobium sp.</i>	Синтетичний консорціум (Ізоляти LS1, 3B14, 1B3) (<i>Actinobacteriota</i> , <i>Pseudomonadota</i>)	Muangchinda et al., 2025
18	PE, PP	Змішані муніципальні відходи (Іспанія)	Бактерії	<i>Rhodanobacter</i> , <i>Ottowia</i> , <i>Rhodanopseudomonas</i> , <i>Castellaniella</i> , <i>Parvibaculum</i> , <i>Bacillus</i>	Мікробний консорціум (MMCs, Аналіз 16S секвенування)	Lomwongsophon et al., 2025

19	LDPE, PET, HDPE	Звалище (Getliņi ЕКО, Латвія)	Бактерії	<i>Bacillus sp.</i> , <i>Pseudomonas sp.</i> , <i>Streptomyces sp.</i> , <i>Paenibacillus sp.</i> , <i>Stenotrophomonas sp.</i>	Мікробний консорціум (Метагеномний аналіз звалища) (Включає <i>B. altitudinis</i> , <i>B. cereus</i>)	Pereira et al., 2025
20	PP	N/A	Бактерії	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Мікробний консорціум (Штами ATCC) (Bacillota)	Tousizadeh et al., 2025
21	PE	Активований мул	Бактерії	N/A	Мікробний консорціум (Збагачена спільнота, MAGs/Метагеноміка) (Таксони: <i>Arsenicibacter</i> , <i>Rhodanobacteraceae</i> , <i>Haliangiaceae</i>)	Li et al., 2025
22	LDPE	Бактерії асцидій (Острови Карімунджава, Індонезія)	Бактерії	<i>Vibrio fortis</i>	Чиста культура (Ізолят KJ11–10(-4)/5) (Pseudomonadota)	Zidannajiyah et al., 2025
23	PE	Ґрунт	Бактерії	<i>Serratia marcescens</i>	Чиста культура (Мутагенізований штам XZ-60S) (Pseudomonadota)	Xiong et al., 2025
24	PS	N/A (Лабораторний організм)	Інфузорії	<i>Tetrahymena thermophila</i>	Модельний організм (Protozoa)	Li et al., 2025

25	LDPE	Звалище (Райпур, Чхаттісгарх, Індія)	Бактерії	<i>Bacillus paramycoides</i>	Чиста культура (Ізолят BH-5) (Bacillota)	Tirkey et al., 2025
26	PE	Річкові осади, забруднені важкими металами	Бактерії	<i>Mycobacterium sp.</i>	Чиста культура (Використано MAG.14 для аналізу генів) (Actinobacteriota)	Kong et al., 2025
27	LDPE	Забруднений ґрунт (Брно, Чехія)	Бактерії	<i>Paenarthrobacter nitroguajacolicus</i> , <i>Rhodococcus erythropolis</i>	Чиста культура / Ко-культура (Ізоляти PSG7, ZZ7) (Actinobacteriota)	Cabiglieri et al., 2025
28	PS, PET, PP	Морська екосистема (узбережжя Атлантики, Марокко)	Бактерії	<i>Exiguobacterium</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i>	Мікробний консорціум (16S секвенування спільноти)	Abelouah et al., 2025
29	PE	Офшорні води Південної півкулі	Бактерії	N/A	Природне мікробне угруповання (Shotgun метагеноміка) (Філуми: <i>Cyanobacteria</i> , <i>Pseudomonadota</i> , <i>Bacteroidota</i>)	Carrillo-Barragán et al., 2025
30	LDPE	Старе муніципальне звалище (~50 років)	Бактерії	<i>Burkholderia sp.</i>	Мікробний консорціум (Аеробний/Анаеробний), MAGs/Метагеноміка	Merchant et al., 2025
31	PP	Відкрите звалище (Кхон Каен, Таїланд)	Бактерії	<i>Bacillus sp.</i>	Мікробний консорціум (Ізоляти CPP-KKU), Метагеномне секвенування (Домінування Bacillota)	Choonut et al., 2025

32	PLA, PBAT, PP, PE	Мангрові осади (Хайнань, Китай)	Бактерії	N/A	Мікробний консорціум (Пластисфера, Аналіз спільноти, Філуми: <i>Proteobacteria</i> , <i>SRB</i>)	Su et al., 2025
33	LDPE	Морська мікропластисфера (Андаманські та Нікобарські острови)	Бактерії	<i>Lysinibacillus sp.</i>	Чиста культура (Ізолят NIOT-MP-52) (<i>Bacillota</i>)	Joshi et al., 2025
34	PE	Морське середовище (морський штам)	Гриби	<i>Aspergillus terreus</i>	Чиста культура (Штам CBS 153402)	Lesuis et al., 2025
35	PCL	N/A	Гриби	<i>Clonostachys rosea</i>	Чиста культура (Раніше <i>Gliocladium roseum</i>)	Gambarini et al., 2025
36	PE	N/A	Гриби	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Чиста культура (Білий гнильний гриб)	Li et al., 2025
37	LDPE, PET	Прісноводна біоплівка (Озеро Женева)	Бактерії	N/A	Мікробний консорціум (Бактеріальна біоплівка, 16S секвенування, Родини/Класи: <i>Sphingomonadaceae</i> , <i>Actinobacteria</i>)	Mori-Bazzano et al., 2025
38	PP, PS	Водно-болотні угіддя та компост	Бактерії	<i>Gordonia</i> <i>sp.</i> , <i>Arthrobacter sp.</i>	Чиста культура / Ко-культура (Ізоляти iso11, iso16, Геномний аналіз) (<i>Actinobacteriota</i>)	Coughlin et al., 2025

39	PP, PVC	Звалище (Газіабад, Індія)	Бактерії	<i>Acinetobacter baumannii</i>	Чиста культура (Ізолят B1) (Pseudomonadota)	Bansal et al., 2025
40	PVC	Ґрунт альпійських луків (Тибетське плато)	Бактерії	<i>Burkholderia sp.</i> , <i>Rhodococcus sp.</i>	Мікробний консорціум (Включає Дегалогеназу SerB як Фермент) (Pseudomonadota/Actinobacteriota)	Jiang et al., 2025
41	PET	N/A	Бактерії / Гриби	<i>Ralstonia sp.</i> , <i>Exophiala sp.</i> , <i>Vanrija sp.</i>	Мікробний консорціум (Консорціум K–Cns, 16S секвенування) (Pseudomonadota, Ascomycota)	Giyahchi et al., 2025
42	LDPE	N/A	Бактерії / Гриби	<i>Bacillus velezensis</i> , <i>Sarocladium strictum</i>	Ко-культура (Ізоляти EBL50, EBL60)	Alidoosti et al., 2025
43	PE	Ґрунт ботанічного саду (Ганьсу, Китай)	Бактерії	N/A	Мікробне угруповання (Аналіз спільноти)	Hu et al., 2025
44	PU, PE	N/A	Гриби	<i>Lasiodiplodia iranensis</i>	Чиста культура	Okal et al., 2025

* PP – Поліпропілен, PU – Поліуретан, LDPE – Поліетилен низької щільності, PS – Полістирол, PVC – Полівінілхлорид, PE – Поліетилен, PET – Поліетилентерeftалат, HDPE – Поліетилен високої густини, PCL – Полікапролактон, PLA – Полімолочна кислота, PBAT – Полібутилен.

Техніка безпеки та охорона праці

Перед початком роботи за комп'ютером:

- Підготуйте робоче місце. З дозволу викладача займіть своє місце та налаштуйте робочу зону, висоту стола і стільця, підставку для ніг, кут нахилу монітора.
- Екран повинен бути на відстані 40-80 см від очей (залежно від розміру елементів на екрані), його центр – трохи нижче рівня очей, а лінія зору – перпендикулярна до екрана.
- Клавіатура має бути на відстані 10-30 см від краю стола, нахилена на 5- 15 градусів, руки зігнуті під кутом близько 90 градусів.
- Стілець має забезпечувати опору спині, а ноги – опору на підлозі або підставці.
- Приберіть зайві предмети зі столу.
- Переконайтеся, що ваші руки чисті. При потребі вимийте та витріть їх насухо.
- Огляньте техніку. З дозволу викладача та за допомогою спеціально призначеної серветки протріть екран монітора, клавіатуру, мишу та килимок (за необхідності).
- Перевірте комп'ютерне обладнання на відсутність зовнішніх пошкоджень.
- Увімкніть комп'ютер. З дозволу вчителя увімкніть комп'ютер.

Під час роботи:

- Підтримуйте порядок. Тримайте робоче місце чистим та охайним. Правильна постава. Зберігайте правильну поставу, не нахиляйтесь близько до екрана та уникайте напруження в руках.
- Робіть перерви кожні 15-20 хвилин або при відчутті втоми, виконуючи комплекс вправ для очей та розслаблення м'язів.
- При будь-яких помилках у роботі комп'ютера, негайно зверніться до викладача. Не торкайтесь задніх стінок монітора та системного блоку, дротів живлення.

- Акуратно вставляйте та виймайте змінні носії. Не торкайтесь екрана монітора руками. Заборонено самотійно відкривати корпуси пристроїв, підключати чи відключати обладнання без дозволу викладача.

Після закінчення роботи:

- Приберіть робоче місце.
- З дозволу викладача вимкніть комп'ютер або завершіть сеанс роботи.

Дії у разі повітряної тривоги

- У разі оголошення повітряної тривоги негайно припиніть роботу.
- Збережіть всі файли, вимкніть комп'ютер (за наявності часу) та переходьте до найближчого укриття відповідно до затверджених маршрутів евакуації. Повернення до роботи дозволяється лише після офіційного відбою. Перебування в приміщенні під час тривоги заборонене.

Дії у разі аварійного або планового відключення електроенергії

- Під час можливих відключень електропостачання передбачається автоматичне збереження файлів та використання хмарних сервісів для резервного копіювання.
- При появі ознак нестабільної напруги або попереджень про відключення завершіть роботу коректно та вимкніть обладнання. Після знеструмлення всі прилади залишайте від'єднаними від мережі до відновлення стабільного електропостачання.