

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Медичний факультет
Кафедра хімії та фармації

**ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ДЛЯ
ВИРОБНИЦТВА БІОРОЗКЛАДНИХ ПЛАСТИКІВ**

Кваліфікаційна робота
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Виконала: здобувачка 4 курсу, 442 групи

Спеціальності 102 Хімія

Освітньо-професійної програми Хімія

Чекамова Поліна Сергіївна

Керівник: кандидатка біологічних наук, доцентка

Пилипчук Л.Л.

Рецензент: Семенченко О.О., кандидатка технічних наук, доцентка кафедри
хімічних технологій, експертизи та безпеки харчових продуктів

Херсонського національного технічного університету

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	5
1.1. Загальна характеристика та властивості біопластику.....	5
1.2. Сільськогосподарські відходи як сировина для біопластику.....	9
1.3. Літературний огляд сучасного стану проблеми.....	13
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ВИДІВ БІОПЛАСТИКУ	14
2.1. Види біорозкладних пластиків	15
2.2. Методи переробки сільськогосподарських відходів на пластики.....	19
2.2.1. Фізичні методи.....	19
2.2.2. Хімічні методи.....	20
2.2.3. Біохімічні методи.....	20
2.2.4. Порівняльна характеристика методів.....	20
РОЗДІЛ 3. ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВІДХОДІВ ПЛАСТИКУ	25
3.1. Проблема забруднення довкілля пластиком.....	25
3.2. Методи вирішення проблеми.....	26
3.3. Біопластик як альтернативний метод вирішення проблеми.....	29
ВИСНОВКИ.....	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному світі проблема забруднення навколишнього середовища пластиком набула глобального масштабу та стала однією з найсерйозніших екологічних загроз. Щороку у світі виробляються мільйони тонн пластмас, більшість з яких не підлягають біологічному розкладу, що призводить до накопичення сміття на суходолі та у Світовому океані. Такий стан справ створює серйозне навантаження на екосистеми та здоров'я людини. Традиційні нафтопохідні пластики можуть зберігатися в навколишньому середовищі сотні років, не розкладаючись, що викликає потребу у пошуку ефективних та екологічно чистих альтернатив.

Одним із перспективних напрямів у вирішенні цієї проблеми є розробка біорозкладних пластиків на основі відновлюваної сировини. Зокрема, використання відходів сільського господарства, таких як солома, стебла кукурудзи, пшеничні полови та інші рослинні рештки, набуває дедалі більшої популярності. Ці матеріали не лише доступні та дешеві, а й здатні значно зменшити обсяг сміття, яке потрапляє на звалища.

Аграрний сектор генерує велику кількість біомаси, яка часто залишається невикористаною або спалюється, спричиняючи додаткове забруднення повітря. Тому можливість ефективного використання таких залишків як сировини для виготовлення екологічно безпечних матеріалів має надзвичайне значення. Це не лише дозволяє зменшити екологічний слід, але й сприяє розвитку циркулярної економіки, створенню нових робочих місць та підвищенню ефективності використання природних ресурсів.

Метою дослідження є аналіз технологічних підходів переробки відходів сільського господарства для виробництва біорозкладних пластиків.

Для досягнення поставленої вирішувались **наступні завдання**:

- дослідити загальні характеристики та властивості біопластику;
- охарактеризувати види біорозкладаних пластиків на основі сільськогосподарських відходів;

- проаналізувати існуючі технології переробки сільськогосподарських відходів на біопластик;

- охарактеризувати екологічні та економічні переваги запропонованої біотехнології.

Об'єкт дослідження: переробка відходів.

Предмет дослідження: процес переробки сільськогосподарських відходів на біорозкладні пластики.

Методи дослідження включають аналітичні, хімічні, фізико-хімічні методи досліджень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що результати дослідження можуть бути використані для розробки технологічних рішень і рекомендацій щодо інтеграції виробництва біорозкладних пластиків з відходів сільського господарства у промислову практику, що сприятиме зменшенню екологічного навантаження від пластикових відходів та підтримці принципів сталого розвитку, а також відкриє нові можливості для утилізації сільськогосподарських відходів.

Апробація результатів дослідження: За результатами нашого дослідження сформовано та опубліковано наукову тезу за темою: «Виробництво біорозкладних пластиків» у чотирнадцятому випуску альманаху QN (Quaestiones Naturales). Також результати дослідження будуть представлені на VII Всеукраїнській студентській науково-практичній інтернет-конференції «Студентський науковий вимір проблем природничо-математичної освіти в контексті інтеграції України до єдиного європейського і світового освітнього простору», яка відбудеться 15–16 травня 2025 року на базі факультету природничої і фізико-математичної освіти Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка (м.Глухів).

Структура роботи. Кваліфікаційна робота містить наступні структурні елементи: вступна частина, три розділи (перший розділ присвячений загальному аналізу біопластику, другий розділ – аналізу сучасних видів

біопластику, третій – екологічним проблемам відходів пластику), висновок, список використаної літератури (30 найменувань). Робота містить таблиці та рисунки. Загальний обсяг роботи складає 36 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Загальна характеристика та властивості біопластику

Біопластик і біоматеріали стають популярними завдяки своїм екологічно безпечним властивостям та як альтернатива традиційним пластиковим матеріалам, виготовленим із викопного палива. Рослинні полімери, отримані з кукурудзяного крохмалю та цукрової тростини, пропонують стійке рішення екологічних проблем, спричинених звичайними пластиками [1].

Основною перевагою біопластиків є їх походження з відновлюваних ресурсів, що дозволяє знизити залежність від невідновлюваних викопних видів палива. Це також сприяє зменшенню викидів парникових газів під час виробництва, оскільки під час росту рослин поглинається вуглекислий газ, що компенсує частину викидів. Іншою важливою характеристикою є здатність до компостування та біологічного розкладу, що особливо актуально в регіонах, де широко поширений одноразовий пластик.

Використання біопластиків та біоматеріалів у виробництві пляшок, плівок, контейнерів — стає все більш популярним завдяки їхній універсальності. Постійні дослідження й розробки дозволяють адаптувати ці матеріали, покращуючи їхні властивості, такі як міцність, гнучкість. Це розширює можливості використання біопластиків у різних галузях промисловості [1].

Належне управління утилізацією та компостуванням, включаючи наявність спеціалізованих установок, є важливим для забезпечення ефективного циклу використання цих біоматеріалів. Для цього необхідно активно проводити навчання споживачів щодо правильних практик утилізації.

Фізичні властивості біопластиків відіграють важливу роль у визначенні їх придатності для використання в упаковці. Механічна міцність і довговічність є головними факторами, особливо коли мова йде про захист і цілісність упаковки під час транспортування та зберігання. Одним із

сільськогосподарських відходів, що значно покращує механічні властивості пакувальних матеріалів, є рослинне волокно. Воно надає упаковці більшу стійкість до розривів, проколів та інших механічних пошкоджень, що можуть виникати в процесі пакування та транспортування [1].

Крім того, сільськогосподарські відходи можна обробляти для покращення їх механічних характеристик. Вилучення волокна та виробництво композитних матеріалів з цих відходів дозволяє значно розширити можливості їх використання в упаковці, підвищуючи її міцність і надійність.

Гнучкість і пластичність є важливими характеристиками упаковки, особливо коли потрібно адаптувати її до форми продукту, що пакується. Серед біопластиків є плівки, виготовлені з рослинних волокон, які чудово підходять для виготовлення упаковки. Ці матеріали можуть легко адаптуватися до різних форм предметів, забезпечуючи ефективний захист і зручність у використанні. Сільськогосподарські відходи можуть бути значно змінені та покращені завдяки обробці такими методами, як екструзія, що дозволяє зробити їх більш гнучкими та пластичними. Це відкриває нові можливості для їх застосування в пакувальній промисловості, зокрема для упаковки, яка облягає форму. Така упаковка є особливо корисною при упаковці крихких або асиметричних предметів, де важлива точність пакування і захист продукту.

Співвідношення ваги до міцності також є важливим фактором при проектуванні упаковки. В окремих випадках необхідно мінімізувати вагу упаковки без шкоди для її міцності. Сільськогосподарські відходи мають перевагу завдяки своїй легкості і чудовому співвідношенню ваги та міцності. Це допомагає зменшити загальну кількість матеріалу, необхідного для упаковки, а також знижує витрати на транспортування [2].

Крім того, такі відходи можна комбінувати з іншими полімерами або зміцнювачами для створення легких композитних матеріалів, що максимально використовують співвідношення ваги і міцності. Це дозволяє оптимізувати упаковку для специфічних вимог і зменшити екологічний вплив, пов'язаний з її обробкою та транспортуванням.

Текстура та поверхневі характеристики упаковки також є важливими аспектами. Вони впливають на споживчий досвід, можливості брендингу та візуальну привабливість упаковки. Упаковка з сільськогосподарських відходів виглядає природною і органічною, що приваблює екологічно свідомих споживачів. Завдяки різноманітним текстурам ці матеріали дозволяють підлаштовувати упаковку відповідно до бажаних тактильних і візуальних характеристик, таких як гладка поверхня або рельєфні візерунки. Також упаковка придатна для друку, що відкриває можливості для ефективного маркетингу завдяки чітким і привабливим маркуванням та логотипам [2].

Хімічні властивості сільськогосподарських побічних продуктів визначають їх придатність для виготовлення упаковки, що здатна ефективно зберігати продукцію. Оскільки багато сільськогосподарських матеріалів мають схильність до природного руйнування через вплив мікроорганізмів, біорозкладність є важливим аспектом при їх використанні для пакування. Здатність до біологічного розкладу упаковки з сільськогосподарських відходів зменшує її стійкість в навколишньому середовищі, відповідно до вимог екологічної стійкості. Концепція циклічної економіки підтримує використання біорозкладних матеріалів, оскільки вони можуть бути безпечно реінтегровані в екосистему, не завдаючи шкоди довкіллю.

Біорозкладаність сільськогосподарських відходів дозволяє досягти необхідної швидкості розкладу упаковки залежно від конкретних умов застосування. Це дозволяє не лише враховувати екологічні вимоги, але й налаштовувати параметри розкладу під потреби продукту. Хімічна стійкість таких матеріалів є важливою властивістю, оскільки вона забезпечує їх здатність зберігати структурні й функціональні характеристики протягом тривалого часу. Упаковка, виготовлена з сільськогосподарських відходів, може ефективно захищати продукт, зберігаючи його термін придатності та якість. Завдяки хімічній стабільності, така упаковка здатна витримувати різні рівні рН, вологість та інші хімічні властивості продуктів.

Водонепроникність і стійкість до вологи є критичними характеристиками упаковки, що визначають її здатність захищати вміст від зовнішніх джерел вологи. Гідрофобні або гідрофільні властивості деяких сільськогосподарських відходів впливають на їх водостійкість, що важливо для продуктів, чутливих до вологи. Ці властивості можуть бути покращені через обробку спеціальними методами, що підвищує довговічність упаковки.

Також важливою є стійкість упаковки до ультрафіолетового (УФ) світла. Деякі сільськогосподарські відходи можуть володіти властивістю фільтрувати УФ-промені, що робить їх корисними для пакування продуктів, чутливих до сонячного випромінювання. Додаткова обробка сільськогосподарських відходів для підвищення їх стійкості до УФ-руйнування дозволяє створювати упаковку, що зберігає свою цілісність навіть при тривалому впливі сонячного світла. Це особливо важливо для продуктів, що потребують подовженого терміну зберігання або для упаковки, що використовується на відкритому повітрі [3,4].

Завдяки своїм термічним властивостям сільськогосподарські відходи можуть бути використані для виготовлення упаковки, здатної ефективно зберігати продукти в різних температурних умовах. Сільськогосподарські відходи часто демонструють високу термічну стабільність, що забезпечує збереження структурної та функціональної цілісності пакувальних матеріалів навіть при змінних умовах навколишнього середовища. Ці матеріали можна використовувати для пакування товарів, що потребують холодного зберігання, або для транспортування швидкопсувних продуктів, оскільки вони мають ізоляційні властивості й можуть діяти як бар'єр проти передачі тепла. Деякі сільськогосподарські відходи мають вищу температуру плавлення, що підвищує їх термічну стабільність і робить їх придатними для пакування продуктів, які вимагають стійкості до високих температур. Крім того, багато відходів мають низьку теплопровідність, що робить їх ідеальними для використання в ізольованій упаковці, здатній зберігати тепло. Це дозволяє зберігати продукцію, таку як харчові продукти чи фармацевтичні препарати,

які чутливі до температурних коливань, зберігаючи їх у належних умовах протягом тривалого часу [5].

1.2. Сільськогосподарські відходи як сировина для біопластику

Сільськогосподарські відходи являють собою величезний і в основному невикористаний ресурс для виробництва біорозкладаного пластику. Поживні залишки, включаючи кукурудзяну соломку, рисову соломку, пшеничну соломку та цукрову тростину, складають значну частину доступної сировини [6].

Рисова соломка, наприклад, містить приблизно 32-47% целюлози ($(C_6H_{10}O_5)_n$), 19-27% геміцелюлози ($nC_6H_{12}O_6$) та 5-24% лігніну (рис 1.1.), що робить її чудовим джерелом для екстракції біополімерів [7].

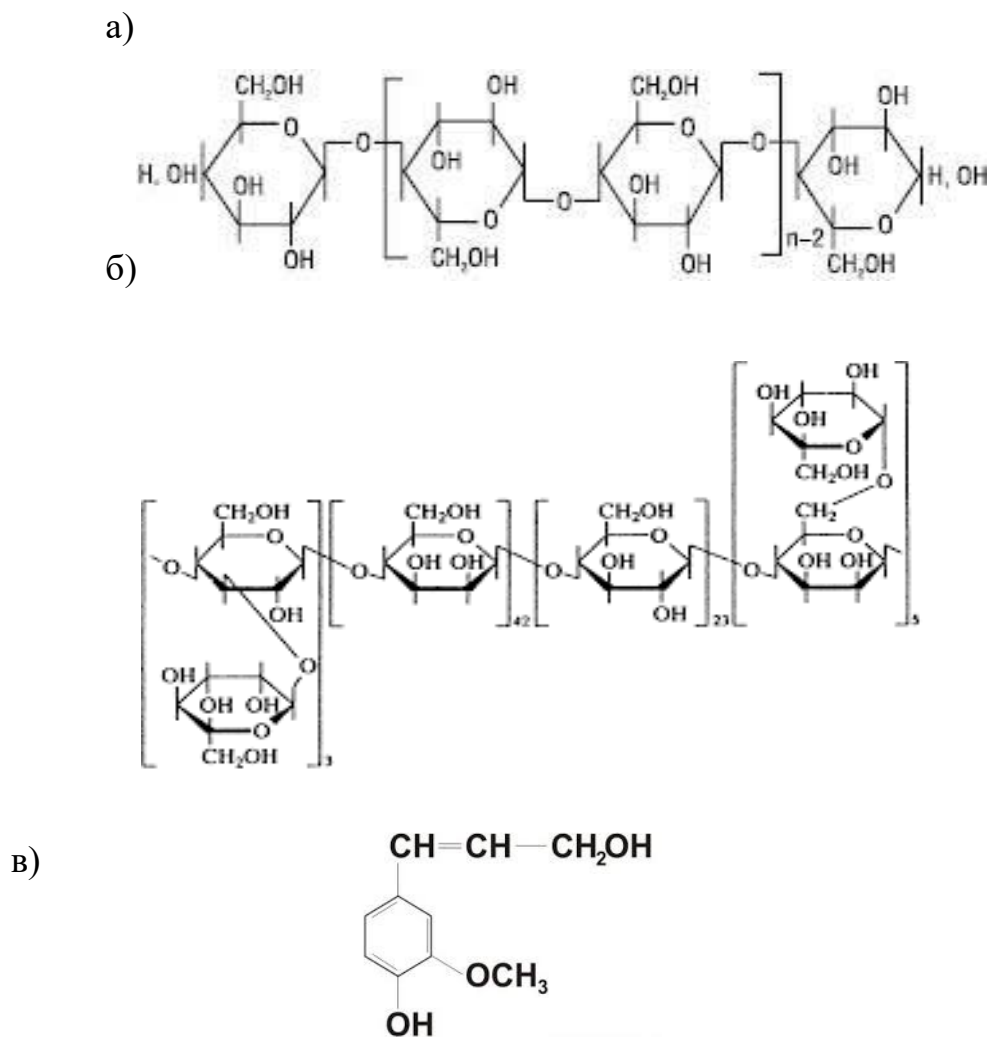


Рис. 1.1. – Структурні формули целюлози (а), геміцелюлози (б)
та лігніну (в)

Ще однією цінною категорією сільськогосподарських відходів є відходи харчової промисловості. Фруктова шкірка, овочеві залишки та інші побічні продукти часто містять високі концентрації цінних сполук, придатних для виробництва біорозкладаного пластику.

Відходи картопляної шкірки, багаті крохмалем, особливо перспективні як сировина. Дослідження показали, що відходи картопляної шкірки містять 50-60% крохмалю (рис. 1.2) в перерахунку на суху вагу, який можна ефективно перетворити на біорозкладану пластмасу за допомогою різних методів обробки [8].

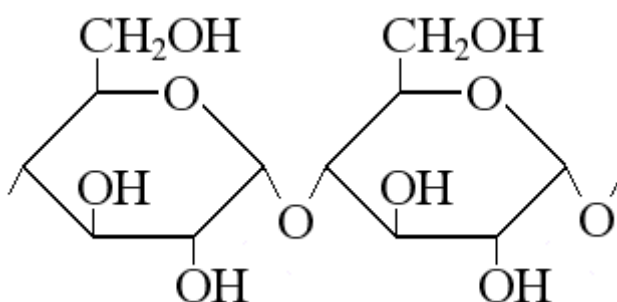


Рис. 1.2. – Структурна формула крохмалю

Подібним чином бананові шкірки, що містять приблизно 30-40% целюлози та значну кількість пектину, були успішно використані для розробки біорозкладаних композитів.

Вибір відповідних сільськогосподарських відходів для виробництва біорозкладаного пластику залежить від кількох важливих факторів. До них відносяться:

1. Наявність і сезонність відходів.
2. Хімічний склад.
3. Вологість.
4. Наявність цінних біополімерів. Регіональні відмінності в сільськогосподарській практиці та моделях утворення відходів значно впливають на вибір сировини. Наприклад, рисова солома поширена в країнах Азії, тоді як кукурудзяна солома більш доступна в Північній Америці [9].

Попередня обробка сільськогосподарських відходів відіграє життєво важливу роль в ефективному видобутку біополімерів. Фізична попередня

обробка, включаючи зменшення розміру, подрібнення та сушіння, покращує властивості матеріалу для обробки та збільшує площу поверхні для подальшої хімічної або біологічної обробки. Попередня хімічна обробка, така як лужний гідроліз, кислотна обробка або екстракція органічним розчинником, допомагає зруйнувати складну лігноцелюлозну структуру та полегшити виділення бажаних компонентів [10]. Вибір методу попередньої обробки істотно впливає на якість і вихід екстрагованих біополімерів.

Зберігання сільськогосподарських відходів є додатковими проблемами, які необхідно вирішити. Сезонний характер утворення сільськогосподарських відходів вимагає ефективних рішень для зберігання, щоб забезпечити цілорічну доступність для виробництва біорозкладаного пластику. Правильне зберігання - необхідна умова для запобігання деградації, забрудненню та втраті цінних компонентів. Контроль вологості, регулювання температури та захист від шкідників є вирішальними аспектами зберігання сільськогосподарських відходів [11]. Характеристика потоків сільськогосподарських відходів є важливим питанням для оптимізації їх використання у виробництві біорозкладаного пластику. Передові аналітичні методи, зокрема інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є, дифракція рентгенівських променів і термогравіметричний аналіз, надають детальну інформацію про:

1. Хімічний склад.
2. Кристалічність.
3. Термічні властивості сільськогосподарських відходів. Ця інформація керує вибором відповідних технологій перетворення та параметрів процесу [12]. Загальна кількість цінних компонентів у складі сільськогосподарських відходів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Кількість цінних компонентів у складі сільськогосподарських відходів

Сільськогосподарські відходи (%)	Целюлоза	Гемі - целюлоза	Лігнін	Крохмаль	Інші компоненти
Рисова солома	32-47	19-27	5-24	-	4-9
Кукурудзяні відходи	35-45	25-35	15-21	-	5-10
Картопляна шкірка	15-20	7-10	1-2	50-60	10-15
Пшенична солома	35-45	20-30	15-20	-	5-10
Жом цукрової тростини	40-50	25-35	20-25	-	3-5
Бананова шкірка	30-40	10-15	5-10	-	35-45

Складено автором на основі матеріалів [12]

Економічні аспекти збору та транспортування сільськогосподарських відходів значно впливають на життєздатність виробництва біорозкладаного пластику.

Необхідно розробити ефективні системи логістики, щоб мінімізувати витрати на транспортування та вплив на навколишнє середовище. Створення децентралізованих переробних потужностей поблизу місць утворення сільськогосподарських відходів може допомогти оптимізувати ланцюжок постачання та зменшити експлуатаційні витрати [13].

Контроль якості сільськогосподарських відходів має вирішальне значення для забезпечення стабільного виробництва біорозкладаного пластику. Необхідно встановити стандартизовані протоколи для характеристики відходів, обробки та зберігання для підтримки стандартів якості. Регулярний моніторинг вологості, рівня забруднення та хімічного складу допомагає оптимізувати умови переробки та забезпечити якість продукції [14].

1.3. Літературний огляд сучасного стану проблеми

Як зазначено в дослідженні авторів G. Davis, J. Song [15] біорозкладні полімери розширюють діапазон варіантів поводження з відходами порівняно з традиційними пластиками. Найпопулярнішим варіантом утилізації цих

матеріалів у кінці терміну служби є компостування в домашніх умовах та муніципальне компостування замість сміттєзвалища, яке є найгіршим варіантом утилізації. Таким чином, біорозкладані полімери можуть зробити значний внесок у зменшення сміттєзвалищ і використання відновлювальних ресурсів.

В іншому дослідженні, авторів Demetres B. , Epifania B. та ін. зазначається, що через труднощі у відновленні звичайної поліетиленової мульчуючої плівки після її використання були розроблені та комерціалізовані плівки, що біологічно розкладаються. Це плівки (зазвичай виготовлені з біоматеріалів), які після використання можна закопувати в ґрунт разом із рослинними рештками для розкладання мікроорганізмами [16].

Програма Bio-Preferred Міністерства сільського господарства США зробила важливий крок у просуванні біопластику на рівні федеральних закупівель. У 2012 році двома найпоширенішими біорозкладаними полімерами були полімери на основі полімолочної кислоти і крохмалю, на які припадало відповідно близько 47% і 41% загального виробництва біорозкладаних полімерів [17].

Іншим прикладом є мікробні полігідроксиалканоати, які протягом останніх багатьох років розроблялися як біологічно розкладні пластики [18]. Вони продаються як біопластик, який при виготовленні має менші викиди CO₂, а також вони незалежні від джерел нафти [19]. Також були проведені дослідження їх промислового застосування.

Було вивчено біологічно розкладаний пластик на основі ацетату целюлози (рис. 1.3) і цей пластик розкладався в ґрунті або воді протягом кількох років. Однак матеріал можна також переробити або спалити без залишку [20].

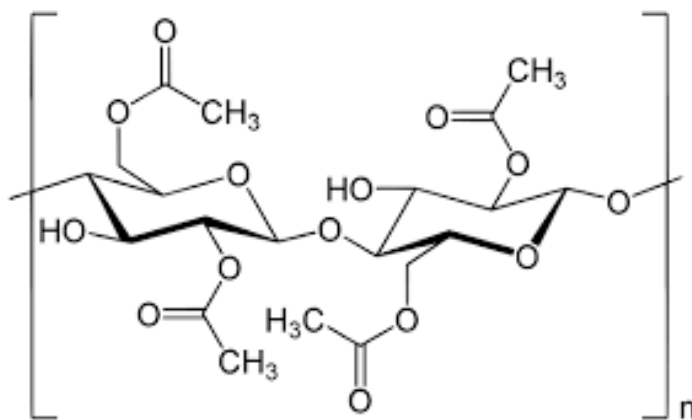


Рис. 1.3 – Структурна формула ацетату целюлози

Були проведені дослідження важливих властивостей, включаючи механічну міцність, ударостійкість, прозорість, здатність до фарбування, універсальність виготовлення, здатність до формування та діелектричну міцність. Крім того, досліджено, що ацетат целюлози можна використовувати для виробництва фотоплівок, ультрафільтраційних мембран, волокон і деяких пластикових інструментів. Біопластик виробляється в рідкому вигляді, тому формується легко і не потребує великої кількості енергії. Це можна порівняти зі звичайним пластиком, який зазвичай зберігається у вигляді гранул і потребує величезної кількості енергії, щоб можна було надати йому форму [21]. Багато дослідників використовували ацетилювання рослинного целюлозного волокна, наприклад субпродуктів бавовни; рисова, пшенична, житня та ячмінна солома; лущиння та деревне волокно тополі для виробництва ацетату целюлози [22].

Оскільки сировина має значний вплив на вартість виробництва біопластику, використання целюлозної сировини з відходів є привабливим для промислового виробництва ацетату целюлози.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ВИДІВ БІОПЛАСТИКУ

2.1. Види біорозкладних пластиків

У сучасному світі проблема пластикових відходів набуває загрозливих масштабів, тому дедалі більше уваги приділяється розробці та впровадженню альтернативних матеріалів, зокрема біорозкладних пластиків. Такі полімери виготовляються з відновлюваної сировини або здатні розкладатися в природних умовах без шкідливого впливу на довкілля. Залежно від складу, властивостей та умов утилізації, існує декілька основних видів біопластиків.

Біорозкладні пластмаси можна розділити на кілька основних категорій залежно від їхнього походження та властивостей. Нижче перелічені деякі з найпоширеніших видів біорозкладних пластиків [23]:

1. Полімолочна кислота (PLA).

Одержується шляхом ферментації крохмалевмісних рослин (кукурудза, цукрова тростина, маніока, буряковий жом), після чого молочна кислота полімеризується в термопластичний полімер. PLA розкладається лише за умов промислового компостування — при температурі понад 60 °C та високій вологості. Має високу прозорість, жорсткість і біосумісність. Широко застосовується у виробництві харчової упаковки, одноразового посуду, косметичних контейнерів, ниток для 3D-друку, медичних імплантатів і текстильних волокон (рис 2.1).

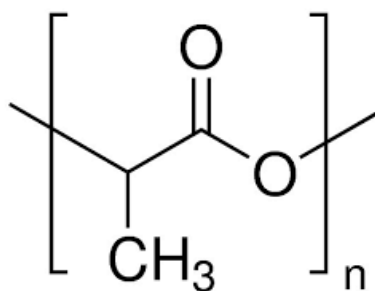


Рис. 2.1. – Структурна формула полімолочної кислоти

2. **Полігідроксиалканоати (PHA).** Ці полімери продукуються мікроорганізмами шляхом ферментації органічних субстратів — цукрів, жирних кислот, рослинних олій. PHA є повністю біорозкладними навіть у морській воді, мають високу термостійкість і стійкість до ультрафіолетового випромінювання. Застосовуються у виробництві медичних швів, біоактивних покриттів, упаковок, плівок для харчових продуктів, а також у біоінженерії тканин (рис 2.2.).

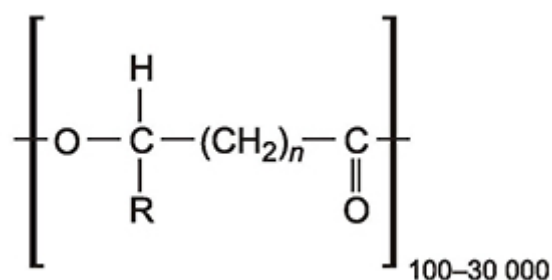


Рис. 2.2. – Структурна формула полігідроксиалканоатів

3. **Полікапролактон (PCL).** Це синтетичний, але біорозкладний поліестер із низькою температурою плавлення (~60 °C). Він розпадається протягом 6–12 місяців у природному середовищі. Володіє гнучкістю, хорошими формувальними властивостями й біосумісністю. Застосовується у 3D-друці, медичних імплантатах, виготовленні форм для біорозкладних виробів, пакуванні електроніки та в моделюванні (рис 2.3).

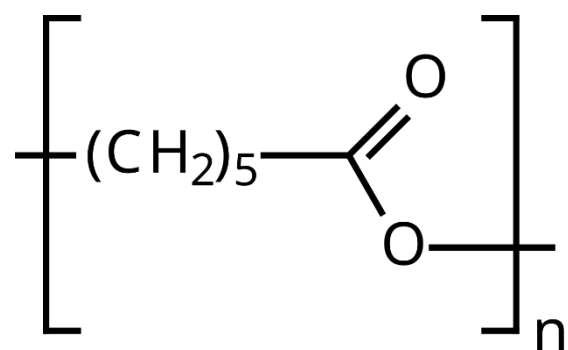


Рис. 2.3 – Структурна формула полікапролактону

4. **Целюлозні плівки.** Виготовляються з натуральної целюлози, отриманої з деревини або іншої рослинної сировини. Характеризуються повною біорозкладністю, гнучкістю, прозорістю та газопроникністю. Є

екологічною альтернативою поліетиленовим плівкам у харчовій промисловості, а також використовуються для виготовлення етикеток, пакувань і наклею.

5. Біопластики на основі крохмалю. Створюються з висококонцентрованого кукурудзяного або картопляного крохмалю з додаванням полімерних компонентів, таких як гліцерин. Вони розкладаються в ґрунті або компості, мають невисоку вартість, проте обмежену міцність і вологостійкість. Використовуються в агросфері (мульчуючі плівки, добрива), пакуванні, виготовленні пакетів, контейнерів, одноразових столових приборів.

6. Полібутиленадипат-ко-терефталат (PBAT). Це гнучкий синтетичний полімер, що біорозкладається в компості. Часто змішується з PLA для покращення механічних властивостей. Має хорошу еластичність, стійкість до розриву та термічну стабільність. Застосовується у виробництві біорозкладних пакетів, сміттєвих мішків, агроплівок, упаковок для свіжих овочів і фруктів (рис 2.4).

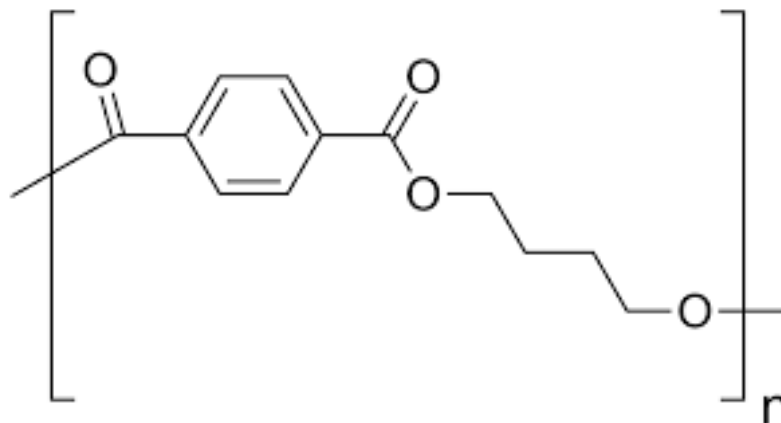


Рис. 2.4 – Структурна формула полібутиленадипат-ко-терефталат

7. Полібутиленсукцинат (PBS) та його сополімери. Ці полімери можуть походити як із біомаси, так і з нафтопродуктів, однак повністю біорозкладаються в біологічних умовах. Мають добру механічну міцність, термостійкість, піддаються термоформуванню. Застосовуються у виробництві одноразового посуду, сільськогосподарських упаковок, промислових плівок, медичних пристроїв і упаковки для електроніки (рис. 2.5).

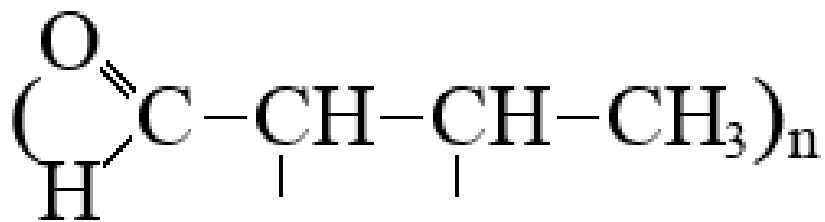


Рис. 2.5 – Структурна формула полібутиленсукцинату

Біорозкладні пластики мають значний потенціал у контексті сталого розвитку. Вони сприяють зменшенню екологічного навантаження, скороченню кількості сміття та зниженню викидів парникових газів. Проте їх широке впровадження потребує вдосконалення технологій виробництва, систем збору та компостування, а також екологічної освіти населення щодо правильного сортування та утилізації таких матеріалів. В таблиці 2.1 наведено основні види біорозкладних пластиків та їхнє застосування [23].

Таблиця 2.1

Основні види біорозкладних пластиків та їхнє застосування

Тип пластику	Джерело	Способи використання
PLA (Полімолочна кислота)	Кукурудзяний крохмаль	Пакування, одноразові столові прибори, біомедичні застосування
PHA (Полігідроксиалканоати)	Цукор, ліпіди	Клінічне застосування, доставка ліків
PCL (Полікапролактон)	Синтетичний полімер	Компостований багаж, клінічні імпланти
Біопластики на основі крохмалю	Крохмаль	Пакування харчових продуктів, сільське господарство
Біопластики на основі целюлози	Целюлоза	Плівки, волокна

Складено автором на основі матеріалів [23,24,25,26]

Характеристики видів біорозкладних пластиків з сільськогосподарських відходів наведено в таблиці 2.2.

Характеристики видів біорозкладних пластиків з сільськогосподарських відходів.

Тип	Межа міцності (МПа)	Водонепроникність	Час біодеградації (місяці)	Приклади виробів
На основі крохмалю	10-45	Помірний	1-6	Упаковки
На основі целюлози	30-120	Добрий	2-2	Плівки, волокна
На основі полігідроксіалканоатів	15-40	Відмінний	3-24	Медичні матеріали, упаковка
На основі білка	5-25	Помірний	1-3	Покриття, плівки
Композитний	25-100	Добрий	2-18	Різне

Складено автором на основі матеріалів [23,24,25,26]

2.2. Методи переробки сільськогосподарських відходів на пластики

Проблема утилізації полімерних матеріалів є актуальною в умовах зростання обсягів пластикових відходів. Вибір оптимального способу переробки зумовлений хімічною природою полімеру, рівнем забрудненості сировини та технологічними параметрами кінцевого продукту. Сучасна наука виокремлює три основні групи методів переробки: фізичні, хімічні та біохімічні [24, 27].

2.2.1. Фізичні методи

Фізичні методи не передбачають зміни хімічної структури полімеру, що обмежує їх застосування для певних видів відходів. Найбільш поширеним є механічний рециклінг, який включає стадії сортування, подрібнення, очищення, сушіння та термічної обробки. Результатом є утворення рециклату — вторинної сировини для виробництва нових полімерних гранул.

До фізичних методів також належить радіаційна обробка, за якої використовується іонізуюче випромінювання (нейтрони, γ - та β -промені), що сприяє деструкції полімерних ланцюгів із формуванням низькомолекулярних сполук.

2.2.2. Хімічні методи

Хімічні способи забезпечують переробку практично всіх типів пластмас завдяки розкладанню полімеру до мономерних одиниць, придатних для повторного синтезу нових матеріалів. До основних підходів належать:

- **Гідроліз і метаноліз** — характеризуються високими енергетичними витратами й вимогами до очищення сировини;
- **Гліколіз** — менш затратний, однак отримані продукти непридатні для харчової промисловості;
- **Піроліз і газифікація** — супроводжуються токсичними викидами, що знижує їхню екологічну доцільність.

2.2.3. Біохімічні методи

Біохімічна переробка базується на використанні мікроорганізмів, здатних здійснювати біодеградацію полімерів без шкідливого впливу на навколишнє середовище. Серед біодеструкторів слід відзначити представників роду *Ideonella sakaiensis*, личинок воскової молі (*Galleria mellonella*) та апендикулярій.

Поліетиленові плівки та пакети демонструють найвищий рівень біодеградації. У процесі мікробного розщеплення формується етиленгліколь — нетоксична сполука, що може бути повторно використана.

2.2.4. Порівняльна характеристика методів

Механічна переробка є найпоширенішим методом завдяки економічній ефективності та відносній простоті технологічного процесу. Її недоліком є зниження якості матеріалу після кількох циклів переробки.

Хімічні методи забезпечують збереження первинних властивостей полімеру, однак потребують значних фінансових витрат і складного технічного оснащення.

У країнах Європейського Союзу та Україні активно реалізуються стратегії обмеження використання первинного пластику та запровадження систем контролю за сортуванням і переробкою полімерних відходів.

Сучасні технології виробництва біопластиків включають:

1. Ферментацію біомаси мікроорганізмами з утворенням полігідроксикарбоатів (PHA). Цей процес передбачає використання певних видів мікроорганізмів (наприклад, *Cupriavidus necator* або *Bacillus subtilis*), здатних синтезувати полігідроксикарбоати — біополімери, що накопичуються в клітинах як резервні речовини. Вони мають властивості, подібні до синтетичних пластикових матеріалів, але є біорозкладними та екологічно безпечними. Ферментація може проводитися на різних джерелах вуглецю, включаючи органічні відходи, що робить цей метод економічно доцільним.

2. Полімеризацію біомономерів, таких як молочна кислота, з отриманням PLA. Молочна кислота може бути отримана шляхом мікробного бродіння цукрів, після чого піддається полімеризації для утворення PLA — термопластичного полімеру, який широко застосовується у виробництві пакувальних матеріалів, медичних імплантів і 3D-друці. PLA є повністю біорозкладним і має хороші механічні властивості, що робить його одним із найпопулярніших біополімерів на ринку.

3. Модифікацію природних полімерів — крохмалю, целюлози, хітозану. Природні полімери можуть бути хімічно або фізично модифіковані для покращення їх технологічних властивостей. Наприклад, з крохмалю отримують термопластичний крохмаль (TPS), який може використовуватися як основа для створення біопластиків. Целюлоза та її похідні використовуються у виготовленні біоплівки, а хітозан, отриманий з хітину, має біоактивні властивості, що робить його перспективним для застосування у медицині та упаковці харчових продуктів.

4. Хімічний синтез з відновлюваної сировини — сукцинатної кислоти, бутанедіолу. Біосинтез сукцинатної кислоти, 1,4-бутанедіолу та інших біомономерів із поновлюваних ресурсів, таких як глюкоза чи гліцерин, дозволяє створювати повністю біоосновні полімери. Наприклад, полібутиленсукцинат (PBS) утворюється внаслідок реакції сукцинатної кислоти з бутанедіолом ($\text{HOOC-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH} + \text{HO-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$

→ Поліестер + Вода)і має хорошу термостійкість та біорозкладність, що робить його конкурентом традиційним пластикам на нафтовій основі.

5. Екструзію та змішування полімерів із пластифікаторами та наповнювачами. Для надання біопластикам необхідних властивостей (еластичність, міцність, стабільність) до їх складу додаються пластифікатори (наприклад, гліцерин) та наповнювачі (натуральні волокна, мінеральні речовини). Екструзія дозволяє одержати вироби різної форми та структури шляхом нагрівання і пресування полімерної маси, а також забезпечує рівномірне розподілення добавок у полімерній матриці.

6. Біоінженерію, що передбачає застосування генної модифікації для підвищення ефективності мікроорганізмів. Генетична інженерія відіграє ключову роль у вдосконаленні мікроорганізмів-продуцентів біополімерів. Шляхом модифікації ДНК вчені можуть підвищити швидкість синтезу, збільшити вихід продукту або забезпечити використання дешевших субстратів (наприклад, відходів агропромисловості). Також створюються трансгенні штами, здатні синтезувати нові типи біопластиків із заданими властивостями.

Удосконалення методів переробки полімерів є стратегічним напрямом для досягнення сталого розвитку. Поєднання традиційних підходів із біотехнологіями відкриває нові можливості для створення екологічно безпечних, ефективних і багатоцільових матеріалів [28].

У таблиці 2.3 наведено методи отримання біорозкладних пластиків.

Таблиця 2.3

Методи отримання біорозкладних пластиків

Тип пластику	Метод отримання
PLA	Ферментація рослинного крохмалю
PNA	Бактеріальна ферментація цукру або ліпідів
PCL	Синтетичний полімеризаційний процес
Біопластики на основі крохмалю	Змішування крохмалю з біорозкладними матеріалами
Біопластики на основі целюлози	Хімічна обробка целюлози

Складено автором на основі матеріалів [28]

У таблиці 2.4. наведено вартість виробництва біорозкладних пластиків.

Таблиця 2.4

Вартість виробництва біорозкладних пластиків

Тип пластику	Вартість виробництва (приблизно)
PLA	1,50 - 3,00 доларів за кілограм
PNA	3,00 - 5,00 доларів за кілограм
PCL	2,00 - 4,00 доларів за кілограм
Біопластики на основі крохмалю	1,00 - 2,50 доларів за кілограм
Біопластики на основі целюлози	1,50 - 3,50 доларів за кілограм

Складено автором на основі матеріалів [28]

Вартість виробництва біорозкладних пластиків є одним із ключових чинників, що впливають на їх поширення на ринку. Хоча попит на екологічно чисті матеріали зростає, ціна біопластиків досі залишається вищою, ніж у традиційних нафтохімічних полімерів, через кілька причин:

1. Дорожча сировина. Для виробництва біопластиків використовуються відновлювані ресурси — кукурудза, цукрова тростина, касторова олія, крохмаль, целюлоза тощо. Їх вирощування, збирання, переробка та очищення потребують додаткових затрат у порівнянні з дешевими нафтовими похідними.

2. Обмежені масштаби виробництва. Біопластики поки що не виробляються у таких обсягах, як традиційні пластики. Через відсутність ефекту масштабу собівартість одиниці продукції вища. Також існує обмежена кількість заводів, що спеціалізуються саме на біополімерах, а деякі з них потребують імпортного обладнання.

3. Складність технологій. Процеси ферментації, полімеризації з біологічної сировини, а також контроль за структурою й властивостями біопластиків вимагають точності, лабораторних умов і часто дорогих ферментів або каталізаторів.

4. Обмеженість технологічної сумісності. Багато біополімерів не можуть використовуватися на тому ж обладнанні, що й нафтохімічні. Це потребує інвестицій у нові виробничі лінії або адаптацію існуючих.

5. Сертифікація та екологічні стандарти. Біопластики часто проходять додаткову сертифікацію на відповідність міжнародним стандартам біорозкладності, компостування, безпеки для харчових продуктів тощо, що також збільшує кінцеву вартість.

Що може знизити вартість у майбутньому:

- Збільшення обсягів виробництва та попиту.
- Розвиток ферментаційних і синтетичних технологій.
- Державні субсидії на "зелені" матеріали.
- Спрощення логістики та локалізація виробництва біопластиків.

У довгостроковій перспективі біопластики можуть стати економічно конкурентоспроможними, особливо в умовах посилення екологічного законодавства, податків на CO₂ і обмеження на одноразові пластикові вироби.

РОЗДІЛ 3

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВІДХОДІВ ПЛАСТИКУ

3.1. Проблема забруднення довкілля пластиком

Проблема забруднення довкілля пластиком є однією з найсерйозніших екологічних загроз сучасного світу. Щороку у світі виробляється понад 400 мільйонів тонн пластику, з яких значна частина — це одноразові вироби, що використовуються лише кілька хвилин, а розкладаються століттями. При цьому лише близько 9% пластику підлягає переробці, а решта накопичується на сміттєзвалищах, забруднює океани, річки, ліси та ґрунти. Через свою довговічність пластик практично не руйнується природним шляхом, а з часом розпадається на мікропластик — дрібні частинки, які легко проникають у довкілля і харчовий ланцюг.

Забруднення пластиком становить серйозну загрозу для живої природи. Морські мешканці, такі як черепахи, кити, риби та птахи, часто ковтають пластикові відходи, плутаючи їх з їжею. Це призводить до фізичних ушкоджень, отруєнь і навіть загибелі тварин. Пластик також може обмежувати рух тварин або спричиняти задушення. Крім того, мікропластик виявляють у тканинах живих організмів по всьому світу — від глибоководних істот до птахів і людини. Для людей мікропластик та хімічні сполуки, що входять до складу пластику, становлять ризик для здоров'я. Деякі з них, як-от бісфенол А чи фталати, можуть негативно впливати на гормональну систему, викликати алергічні реакції, порушення репродуктивної функції та імунної системи. Крім того, мікропластик уже виявляється у воді, яку ми п'ємо, і продуктах, які споживаємо.

Осад стічних вод, в якому осідають мікрочастинки, часто використовують для удобрення полів, як і компост, в якому теж знаходять сліди пластику. Так він потрапляє в ґрунт. Скільки саме мікропластика накопичилося в наземних екосистемах, невідомо. Пластик розкладається дуже

повільно, ми навіть не знаємо, як довго, але, ймовірно, на це йде від 500 до 1000 років [29].

3.2. Методи вирішення проблеми

Одним із ефективних способів утилізації пластикових відходів, зокрема ПЕТ-пляшок і тонкої поліетиленової плівки, є виготовлення полімербетону. Така технологія не потребує складного обладнання, але дозволяє перетворити сміття на корисний матеріал, який можна використовувати для ремонту доріг.

Проблема пластикових відходів виникла ще у XX столітті, коли почалося масове виробництво пластмаси. Через те, що пластик не розкладається природним шляхом, його кількість на звалищах постійно зростає. Особливе занепокоєння викликає ситуація у Світовому океані, де накопичилось безліч пластикової тари. У відповідь багато країн розробили екологічні програми, запровадили сортування сміття та фінансові стимули для населення.

В Україні ж утилізація ПЕТ-пляшок залишається проблематичною. Щомісяця імпортується понад 10 тисяч тонн ПЕТ-грануляту, тоді як потужності з переробки дозволяють опрацювати лише близько 1 тисячі тонн. Решта осідає на сміттєзвалищах. Причиною цього є відсутність системи мотивації для населення – за повернення тари практично не платять.

Виходом із ситуації може стати переробка ПЕТ-пляшок і поліетиленових пакетів у полімербетон. Наші експерименти показали, що шляхом розплавлення бітумної смоли з додаванням подрібненого пластику та піску можна отримати міцний матеріал, придатний для ямкового ремонту доріг. Важливо дотримуватись правильного порядку змішування: спочатку розплавити бітум, потім додавати ПЕТ-пляшки, а далі – поліетиленові пакети. В кінці вносяться наповнювачі – пісок або дрібний щебінь.

Такий підхід дозволяє не лише утилізувати пластикові відходи, а й зменшити витрати на дорожні матеріали, сприяючи захисту довкілля без значних фінансових вкладень.

Переробка пластику значною мірою залежить від технічних, економічних і логістичних умов. Це пов'язано з тим, що синтетичні полімери мають різну структуру, хімічний склад та властивості. Деякі з них після переробки втрачають свої характеристики, тому для ефективної утилізації важливо правильно сортувати і очищати відходи.

Правильна технологія переробки твердих пластмас сприяє:

- зменшенню обсягів пластикових відходів у довкіллі;
- економії енергії, палива і природних ресурсів при виробництві нових виробів;
- розширенню ринку вторинної сировини.

Пластмаси поділяються на різні типи за складом і властивостями, тому маркуються спеціальним символом – трикутником з цифрою, що вказує на тип полімеру та його придатність до переробки (табл. 3.1)[30].

Таблиця 3.1.

Види пластику, що підлягають вторинній переробці

Види пластику / маркування	Сфера використання
Поліетилен (02 HDPE; 04 LDPE)	Є найпоширенішим видом полімерних матеріалів, що використовують для виробництва різних пакувальних матеріалів, пляшок та пакетів
Поліпропілен (05 PP)	Вид полімерів, що використовують для виготовлення упаковок, контейнерів та різних автодеталей.
Полівінілхлорид (3 PVC; 3V)	Використовують для виробництва металопластикових вікон, труб та різних будівельних матеріалів
Поліетілентерефталат (01 PET)	Вид полімерів, що використовують для виготовлення пляшок та різних видів харчових контейнерів.
Полістирол (6 PS)	Вид полімерів з якого виготовляють посуд, різні види пакувань та інші вироби

Складено автором на основі матеріалів [30]

Однак на практиці маркування часто ігнорується або споживачами, або підприємствами, що займаються збиранням сміття, через брак належної інформаційної підтримки та застарілу інфраструктуру. Це ускладнює ефективне сортування й переробку, особливо у регіонах із низьким рівнем екологічної обізнаності населення.

Ще одним перспективним напрямом є використання хімічної (глибокої) переробки пластику, за якої полімери розкладаються до мономерів або інших хімічних сполук, придатних для повторного синтезу. Наприклад, деполімеризація ПЕТ дозволяє отримати терефталеву кислоту та етиленгліколь, які можуть бути використані для виготовлення нових ПЕТ-виробів. Такий підхід наближає сучасну промисловість до принципів циклічної економіки, де відходи не знищуються, а повертаються в обіг як нова сировина.

Також перспективною є біологічна переробка пластмас із використанням спеціальних ферментів або мікроорганізмів. Хоча ця технологія наразі перебуває на стадії активного дослідження, вже існують штами бактерій, здатні частково розкласти ПЕТ та інші поліестери. У майбутньому це може стати проривом у боротьбі з пластиковим забрудненням, особливо у випадках, коли механічна або хімічна переробка є неефективною або економічно недоцільною.

Упровадження таких інноваційних технологій потребує не лише фінансування, а й державної підтримки, наукового супроводу, міжгалузевої співпраці та просвітницької роботи серед населення. Лише комплексний підхід до проблеми пластикових відходів дозволить досягти сталого розвитку, зберегти екологічну рівновагу та забезпечити здорове майбутнє наступним поколінням.

Крім технічних рішень, важливу роль у вирішенні проблеми пластикових відходів відіграє екологічна освіта населення. Поінформовані громадяни охочіше долучаються до сортування сміття, використовують багаторазові вироби, зменшують споживання одноразового пластику та підтримують екологічні ініціативи. Саме через просвітницькі кампанії, шкільні програми та соціальні проєкти формуються нові звички, що поступово змінюють споживчу культуру.

Муніципальні ініціативи також можуть суттєво покращити ситуацію. В окремих містах України вже впроваджуються проєкти з роздільного збору

сміття, встановлюються контейнери для ПЕТ-пляшок, поліетилену та інших видів пластику. Проте їх ефективність часто обмежується через відсутність чіткого механізму подальшої логістики та браку взаємодії з підприємствами з переробки.

Слід також звернути увагу на економічні стимули для бізнесу. Важливо створювати умови, за яких переробка відходів та використання вторинної сировини будуть вигідними. Це можуть бути податкові пільги, субсидії, гранти на інноваційні технології або державно-приватні партнерства. Стимулювання малого та середнього бізнесу у сфері переробки може забезпечити появу нових робочих місць і зростання локальної економіки.

У перспективі доцільно вдосконалювати законодавчу базу, гармонізуючи її з європейськими стандартами. Це стосується норм щодо маркування, відповідальності виробника, обов'язкового використання перероблених матеріалів у промисловості, а також контролю за виконанням екологічних вимог.

Ще одним напрямом, що набуває популярності у світі, є дизайн екологічно безпечної упаковки — тобто розробка виробів з урахуванням їх подальшої утилізації або повної переробки. Концепція «design for recycling» передбачає використання одного типу полімеру в упаковці, мінімізацію бар'єрних матеріалів і простоту розбору. Такі підходи дозволяють значно підвищити ефективність переробки.

У комплексі всі ці заходи — технологічні, освітні, правові й економічні — створюють передумови для переходу до циркулярної моделі управління відходами, де пластикове сміття розглядається не як проблема, а як ресурс.

3.3. Біопластик як альтернативний метод вирішення проблеми

Біопластик розглядається як одна з найперспективніших альтернатив традиційному нафтовому пластику та ефективний метод боротьби з проблемою пластикового забруднення. На відміну від звичайного пластику,

який виробляється з викопних ресурсів і практично не розкладається в природному середовищі, біопластик виготовляється з поновлюваної сировини — кукурудзяного крохмалю, цукрової тростини, картоплі, целюлози, відходів сільського господарства тощо. Деякі види біопластику є біорозкладними, тобто можуть повністю розкладатися під дією мікроорганізмів у природних умовах або в умовах промислового компостування.

Використання біопластику має низку переваг. По-перше, це зменшення залежності від нафти та зниження викидів парникових газів при його виробництві. По-друге, біопластик значно менше шкодить довкіллю, особливо якщо йдеться про вироби одноразового використання, які можуть швидко розкладатися без утворення мікропластику. По-третє, біопластик часто є нетоксичним, а отже, безпечнішим для здоров'я людини.

Однак біопластик має і певні недоліки. Не всі його види повністю біорозкладні — деякі потребують спеціальних умов для розкладання, які відсутні у більшості сміттєзвалищ. Також його виробництво потребує великих обсягів сільськогосподарських земель, води та енергії, що може спричинити конкуренцію з харчовим виробництвом. Крім того, біопластик ще не набув широкого поширення через вищу собівартість порівняно з традиційним пластиком.

Попри це, розвиток технологій біопластику та збільшення обсягів його виробництва створюють реальні передумови для його ефективного впровадження у різні галузі — від пакування та посуду до медицини та сільського господарства. Державна підтримка, інвестиції в дослідження, а також зростаюча екологічна свідомість суспільства сприяють переходу до використання екологічно чистих матеріалів.

У процесі дослідження було здійснено глибокий аналіз сучасного стану проблеми пластикових відходів та перспектив використання біопластику як екологічно чистої альтернативи традиційним полімерним матеріалам. Було з'ясовано, що забруднення довкілля пластиком набуває загрозливих масштабів і потребує невідкладних дій як на глобальному, так і на локальному

рівнях. Значну увагу було приділено можливостям використання сільськогосподарських відходів як сировини для виробництва біопластику — зокрема через економічну доцільність та екологічні переваги такого підходу.

Розглянуто сучасні види біопластику, а також методи їх отримання — фізичні, хімічні та біохімічні — з подальшим порівняльним аналізом ефективності кожного з них. Аналіз показав, що біопластики можуть стати реальною альтернативою нафтохімічним матеріалам, особливо в умовах посилення екологічних норм, податкового тиску на CO₂ та заборони одноразових пластикових виробів.

Особливу увагу було приділено екологічним проблемам, що пов'язані з традиційним пластиком, і запропоновано шляхи вирішення цієї проблеми: вторинна переробка, хімічна і біологічна переробка, а також формування екологічної свідомості серед населення.

ВИСНОВКИ

1. Біопластики та біоматеріали, виготовлені з відновлюваних джерел, таких як сільськогосподарські відходи, є перспективною альтернативою традиційним пластикам. Вони допомагають зменшити залежність від викопного палива, скорочують викиди парникових газів і сприяють зменшенню пластикового забруднення завдяки здатності до біорозкладу та компостування.

2. Сільськогосподарські відходи представляють значний і ще недостатньо використовуваний ресурс для виробництва біорозкладаного пластику. Вони багаті на біополімери, такі як целюлоза, геміцелюлоза та лігнін, що дозволяє ефективно екстрагувати цінні компоненти для створення екологічних матеріалів. Потоки сільськогосподарських відходів, зокрема рисова та кукурудзяна солома, фруктова шкірка та картопляний шкірка, мають великий потенціал для переробки. Однак для досягнення високих результатів необхідно враховувати різні фактори, такі як хімічний склад, сезонність і географічні відмінності в доступності сировини.

3. Важливою складовою є ефективна попередня обробка, зберігання і контроль якості сировини. Розвиток ефективної логістики та використання сучасних аналітичних методів допоможуть оптимізувати процеси переробки та знизити витрати на виробництво біорозкладаного пластику. Біорозкладні полімери, такі як полімолочна кислота і крохмаль, а також мікробні полігідроксиалканоати, стають популярними альтернативами традиційним пластикам завдяки їх здатності до компостування і розкладу без забруднення навколишнього середовища. Вони можуть бути перероблені в ґрунті або воді, що дозволяє зменшити навантаження на сміттєзвалища та сприяє використанню відновлювальних ресурсів. Зокрема, плівки з біоматеріалів, що використовуються в сільському господарстві, можуть бути закопані в ґрунт разом із рослинними рештками для розкладу мікроорганізмами.

4. Біорозкладні полімери, такі як ацетат целюлози, також виявляються перспективними завдяки своїй здатності до біологічного

розкладу та низьким енергетичним витратам на виготовлення. Цей матеріал може бути використаний для виробництва різноманітних продуктів, від фотоплівок до волокон, а також має високі механічні властивості. Для його виробництва використовуються недорогі або відходні матеріали, як бавовна, рисова або пшенична солома, що робить процес виробництва більш економічно вигідним. Вибір сировини має суттєвий вплив на вартість біопластику, і використання таких низькоцінних ресурсів, як целюлоза, відкриває нові можливості для масового виробництва екологічно чистих матеріалів.

5. Біорозкладний пластик з сільськогосподарських відходів знижує вуглецевий слід, зменшує пластикові відходи та сприяє здоров'ю ґрунтів. Економічно вигідний при великих масштабах виробництва, але висока вартість обробки і транспортування залишаються викликом. Розвиток нових технологій та відсутність єдиних стандартів створюють можливості для покращення і зростання ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Barillari, F., Chini, F. Biopolymers-Sustainability for the Automotive Value-added Chain. *ATZ Worldw.* 2020, 122, 36–39.
2. Beghetto, V., Gatto, V., Conca, S., Bardella, N., Buranello, C., Gasparetto, G., Sole, R. Development of 4-(4, 6-dimethoxy-1, 3, 5-triazin-2-yl)-4-methyl-morpholinium chloride cross-linked carboxymethyl cellulose films. *Carbohydr. Polym.* 2020, 249, 116810.
3. Abdo, S. M., & Ali, G. H. Analysis of polyhydroxybutrate and bioplastic production from microalgae. *Bulletin of the National Research Centre*, 2019, 43(1), 97.
4. Acquavia, M. A., Pascale, R., Martelli, G., Bondoni, M., & Bianco, G. Natural polymeric materials: A solution to plastic pollution from the agro-food sector. *Polymers*, 2021, 13(1), 1–39.
5. Holt, G.A., Chow, P., Wanjura, J.D. Evaluation of thermal treatments to improve physical and mechanical properties of bio-composites made from cotton byproducts and other agricultural fibers, *Industrial Crops and Products*, Volume 52, 2014, Pages 627-632.
6. Ashok, A., et al. Conversion of agricultural waste to value-added products: A review. *Biomass and Bioenergy*, 2022, 156, 106301.
7. Chen, H. *Biotechnology of Lignocellulose: Theory and Practice*. Chemical Industry Press and Springer, 2023.
8. Niaounakis, M. Recycling of biopolymers – The patent perspective. *European Polymer Journal*, 2021, 153, 110411.
9. Kawaguchi, H., et al. Green polymer chemistry: New methods for biobased materials. *Progress in Polymer Science*, 2022, 124, 101482.
10. Mostafa, N. A., et al. Conversion of food processing wastes to biopolymer and its applications. *Polymers*, 2021, 13(4), 651.
11. Lee, S. Y., et al. Advances in biological production of polyhydroxyalkanoates. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6, p. 84-98.

12. Wang, X., et al. Biodegradable plastics: Breaking down the facts. *Chemical Reviews*, 2022, 122(9), 9083-9139.
13. Kumar, M., et al. Biodegradable polymers from renewable resources. *Progress in Materials Science*, 123, 2021.
14. Pathak, S., et al. Biodegradable polymers for sustainable packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 2022.
15. G. Davis, J.H. Song. Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management *Ind. Crops Prod.*, 23 (2), 2006, pp. 147-161
16. B. Demetres, B. Epifania, H. Miltiadis, S. Giacomo, P. Pietro, G. Dorleta, D. Cyril. Review, mapping and analysis of the agricultural plastic waste generation and consolidation in Europe. *Waste Manage. Res.*, 31, 2013, pp. 1262-1278
17. M. Petrova, J. Garner. Scientists Use ACS Sci-Mind: Case Study to Examine Biopolymers Industry Posted by a_viverito in Career Development. American Chemical Society, 2014.
18. W. Ying, Y. Jin, C. Guo-Qiang. Polyhydroxyalkanoates, challenges and opportunities. *Curr. Opinion Biotechnol.*, 30, 2014, pp. 59-65
19. G. Chen, M. Patel. Plastics derived from biodegradable sources: present and future: a technical and environmental review *Chem. Rev.*, 112, 2012, pp. 2082-2099
20. A. Alexander. Biodegradable plastics based on cellulose acetate. *Sci., Pure Appl. Chem.*, 3 (9–10), 1993, pp. 733-740
21. Q. Xiaoyun, H. Shuwen. “Smart” materials based on cellulose: a review of the preparations, properties, and applications. *Materials*, 6, 2013, pp. 738-781
22. T. Nishino, M. Kotera, M. Suetsugu, H. Murakami, Y. Urushihara. Acetylation of plant cellulose fibre in supercritical carbon dioxide. *Polymer*, 52, 2011, pp. 830-836
23. Біорозкладний пластик. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.joyful-printing.net/info/biodegradable-plastic-62978422.html> (дата звернення 05.04.25)

24. Zhang, Y., et al. Smart biodegradable materials from agricultural resources. *Advanced Materials*, 34(11), 2022.

24. Park, S. J., et al. Sustainable polymer synthesis: From waste to value. *Chemical Society Reviews*, 52(3), 2023.

25. Liu, H., et al. Biodegradable plastics in agriculture: Functions, challenges and perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(26), 2021.

26. Garcia, C. V., et al. Agricultural waste valorization: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 2021, 111481.

27. Біопластик – майбутнє індустрії. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.products.pcc.eu/uk/blog/біопластик-майбутнє-індустрії-плас/> (дата звернення 08.04.25)

28. Волкова С.А., Пилипчук Л.Л., Андріяш В.В. Утилізація викидів пластика з одержанням користі. «Фундаментальні та прикладні дослідження в сучасній хімії та фармації» : зб. ст. за матер. VII Міжнар. заочної наук.-практ. конф. молодих учених, Ніжин, 21 квітня 2020 р. Ніжи : НДУ ім. Миколи Гоголя, 2020. С. 22-24. URL: <http://ekhsuir.kspu.edu/123456789/16058> (дата звернення 09.04.25.)

29. Hester Ronald E., Harrison, R. M. Marine Pollution and Human Health. Royal Society of Chemistry. «*The New Plastics Economy. Rethinking the future of plastics*», World Economic Forum, 2016, p. 7

30. Васильєва Д., Пилипчук Л. Шляхи утилізації відходів пластика в рамках концепції сталого розвитку на півдні України. зб. ст. за матер. International Scientific Conference. United Kingdom: Cambridge, 2024. 122 с. URL: <https://researcheurope.org/wp-content/uploads/2024/09/re-13.09.2024.pdf> (дата звернення 09.04.25.)