

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.4.5>

Received: 18.08.2026
Revised: 28.09.2026
Accepted: 30.09.2026
Published: 05.10.2026

Павло ШКАРЛАТ, Світлана ГАРМАШ

Український державний університет науки і технологій ННІ
«Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпро,
Україна

УДК 678.552

БІОРОЗКЛАДНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ КРОХМАЛЮ: СУЧАСНИЙ СТАН, ВЛАСТИВОСТІ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Мета. Систематизувати сучасні наукові уявлення про біополімери та біорозкладні полімерні матеріали, складові компоненти, технологічні підходи, властивості, приділивши основну увагу крохмалю як доступній відновлюваній сировині для одержання плівок і композитів на основі термопластичного крохмалю.

Методика. Для огляду проаналізовано іноземні наукові публікації, у яких розглядаються біорозкладні полімери, термопластичний крохмаль, пластифікація і плівкоутворення, введення наповнювачів, зшивання, а також механічні, бар'єрні властивості та біорозкладання матеріалів.

Результати. Аналіз літератури підтверджує, що поняття «біополімер», «біопластик» і «біорозкладний полімер» не є взаємозамінними. Крохмаль привертає увагу як відновлювана й доступна сировина, здатна формувати плівки, однак у нативному стані він крихкий, гігроскопічний і має обмежену термопластичність. Для одержання термопластичного матеріалу необхідно порушити гранулярну структуру крохмалю та послабити міжмолекулярні взаємодії за рахунок дії тепла, води і пластифікаторів. У більшості розглянутих робіт гліцерин підвищував гнучкість і видовження при розриві, тоді як його надлишок міг знижувати міцність при розтягуванні і погіршувати бар'єрні характеристики. Наповнювачі та нанонаповнювачі (CaCO_3 , целюлозні нановолокна, та ін.) за належного диспергування здатні посилювати міцність при розтягуванні матеріалу і поліпшувати його бар'єрні властивості; зшивання за допомогою органічних кислот, своєю чергою, може зменшувати водочутливість і сповільнювати ретроградацію.

Наукова новизна. В результаті проведеного комплексного аналізу сучасних досліджень, присвячених спільним технологічним проблемам крохмальних матеріалів систематизовано дані щодо взаємозв'язку між складом полімерних композицій на основі крохмалю, способом їх формування та кінцевими механічними, бар'єрними й водними властивостями. Показано, що результати модифікації крохмальних матеріалів доцільно оцінювати не за окремими показниками, а комплексно, з урахуванням ботанічного походження крохмалю, природи пластифікатора, виду й концентрації наповнювача, та технологічних умов одержання матеріалу.

Практична значимість. Узагальнені дані можуть бути використані під час вибору оптимального складу крохмальних плівок і способу одержання термопластичного крохмалю та композитів для пакувальних і сільськогосподарських застосувань. Окрему увагу приділено відмінності між фізичним руйнуванням матеріалу та його остаточним біологічним розкладанням.

Ключові слова: полімери; біополімери; крохмаль; термопластичний крохмаль; біорозкладання; технології.

Вступ. Полімерні матеріали давно стали основою багатьох конструкційних, пакувальних, медичних і технологічних рішень. Їх поширення пояснюється поєднанням малої густини, технологічності, хімічної стійкості та можливості цілеспрямовано змінювати механічні, термічні й бар'єрні характеристики. Разом із цими перевагами існує й суттєва проблема: чимало традиційних синтетичних полімерів повільно руйнуються у природному середовищі, тому відходи накопичуються. У відповідь на це в хімічних технологіях і матеріалознавстві активно розвивають матеріали, які дають змогу зменшити використання викопної сировини та забезпечити контрольоване повернення вуглецю до природних циклів [1, 2].

У цьому контексті важливо не змішувати терміни «біополімер», «біопластик» і «біорозкладний полімер». До біополімерів належать, зокрема, природні полімери – крохмаль,

целюлоза, хітозан. Поняття «біопластик» ширше і може стосуватися пластиків із біосировини та/або матеріалів, здатних до біорозкладання; сама назва при цьому не визначає ані походження кожного компонента, ані конкретних умов розкладання. Біогенне походження характеризує джерело сировини, тоді як біорозкладність описує перетворення матеріалу за участю живих організмів [1–3].

Серед природних полісахаридів одним із найчастіше досліджуваних плівкоутворювачів є крохмаль, який одержують із кукурудзи, картоплі, рису, маніоки та інших рослин. Він доступний, відновлюваний і здатний утворювати суцільну плівкову матрицю. Водночас нативні гранули та розвинена система водневих зв'язків ускладнюють його перероблення як звичайного термопласту. Тому в рецептурах застосовують пластифікатори, змішування з іншими полімерами, наповнювачі у вигляді крейди або нановолокон на основі рослинної сировини, та різні варіанти хімічної модифікації, наприклад, зшивання різними органічними кислотами, такими як: лимонна, яблучна, бурштинова та ін. [4–6].

Вибір таких добавок завжди є компромісом між кількома властивостями. Наприклад, зміна кількості пластифікатора одночасно позначається на деформативності плівки та перенесенні вологи, а ефект наповнювача визначається не лише його концентрацією, а й тим, наскільки рівномірно частинки розподілені в матриці [7–9]. Навіть за однакових умов пластифікації крохмалі різного ботанічного походження дають плівки з помітно відмінними характеристиками [10]. Через це склад композиції доцільно аналізувати разом зі способом формування зразка та умовами його випробування.

Мета роботи – систематизувати сучасні наукові уявлення про біополімери та біорозкладні полімерні матеріали, складові компоненти, технологічні підходи, властивості, приділивши основну увагу крохмалю як доступній відновлюваній сировині для одержання плівок і композитів на основі термопластичного крохмалю.

Постановка завдання. Для досягнення поставленої мети було визначено наступні завдання: охарактеризувати місце крохмалю серед природних і біорозкладних полімерів; проаналізувати основні технології формування крохмальних плівок і композитів; узагальнити дані щодо впливу пластифікаторів і модифікувальних добавок на властивості матеріалів; зіставити результати експериментальних досліджень для виявлення спільних тенденцій і технологічних обмежень, які необхідно враховувати під час подальших розробок і вдосконалення технологій одержання полімерних матеріалів на основі крохмалю.

Результати дослідження.

Полімери як клас матеріалів. Полімерний матеріал утворений ланцюгами з повторюваних структурних ланок, проте його поведінка визначається не лише самою будовою мономерної ланки. Важливими є молекулярна маса, розгалуженість, кристалічність і рухливість макромолекул. Для плівок особливе значення мають міцність, деформативність, термічна поведінка та проникність, причому ці параметри залежать і від складу композиції, і від режиму її перероблення [1–3]. За походженням полімери поділяють на природні й синтетичні, але синтетичний полімер може бути одержаний як із нафтохімічних, так і з біогенних мономерів. Отже, саме походження сировини ще не дає підстав вважати кінцевий матеріал біорозкладним [2, 3].

Біорозкладні полімери та механізми деградації. Початкові зміни в полімері можуть бути пов'язані з абіотичним гідролізом або окисненням. Біологічна стадія відбувається за участю організмів і їхніх ферментів; утворені низькомолекулярні продукти надалі можуть засвоюватися мікроорганізмами. Для крохмалю особливо характерний ферментативний гідроліз. На швидкість процесу впливають доступність зв'язків для води й ферментів, кристалічність, молекулярна маса та площа поверхні матеріалу [1, 3, 11].

Оцінка розкладання значною мірою залежить від середовища та обраного методу. Втрата маси, наприклад, не обов'язково означає лише біологічне перетворення: частина розчинних речовин може вимиватися, а фрагменти зразка – втрачатися під час очищення.

Подібно й фізичне руйнування фіксує саме руйнування цілісності матеріалу, але само по собі не підтверджує його повного біологічного розкладання [11].

Цю різницю добре видно в роботі S.T. Chua та співавторів [12]. Плівки з окисненого крохмалю швидко набухали та руйнувались у штучній морській воді. Водночас в іншій частині дослідження, де біорозкладання оцінювали за біохімічним споживанням кисню у природній морській воді, окиснені плівки давали повільнішу відповідь, ніж плівка з нативного крохмалю та гліцерину. Тобто швидке фізичне руйнування зразка не можна автоматично прирівнювати до швидкого біологічного розкладання.

Крохмаль як полімерна сировина. Основними макромолекулярними компонентами крохмалю є амілоза та амілопектин. Їх співвідношення, молекулярна організація й будова гранул впливають на желатинізацію та подальше формування плівкової матриці. Не менш важливим є ботанічне походження сировини: порівняльні роботи показують, що крохмалі та їх суміші можуть істотно відрізнятися за властивостями [4, 10, 13]. Відносно невисока вартість і доступність рослинної сировини роблять крохмаль привабливим для біорозкладних матеріалів, однак практичне застосування обмежують чутливість до вологи, складність термопластичного перероблення та крихкість недостатньо пластифікованих плівок. За механічними показниками багато досліджених крохмальних плівок все ще поступаються традиційній полімерній упаковці [4, 6, 10].

Термопластичний крохмаль і способи формування матеріалів. Термопластичний крохмаль (TPS) формують під одночасною дією тепла, механічного зсуву та пластифікаторів, серед яких найчастіше використовують воду і поліоли. У процесі руйнується впорядкованість гранулярної структури та перебудовується система водневих зв'язків між полісахаридними ланцюгами. За своєю природою це перетворення відрізняється від звичайного плавлення типових термопластів [14, 15].

У лабораторії крохмальні плівки часто одержують методом поливу із водної дисперсії. Спочатку суміш нагрівають до желатинізації, потім наносять на підкладку або заливають у форму і видаляють воду під час сушіння [15, 16]. Такий підхід не варто ототожнювати з формуванням виробів із термопластичної композиції методом екструзії.

Поведінка плівкоутворювальної суміші визначається співвідношенням крохмалю, води, пластифікатора та інших компонентів. Те саме співвідношення надалі впливає і на властивості висушеного шару [15, 17].

Для лабораторного порівняння рецептур метод поливу особливо зручне, оскільки тонкі зразки можна одержати без екструдера. Водночас саме видалення розчинника залишається головним технологічним обмеженням цього способу. Тривалість і температура сушіння впливають на структуру плівки, а необхідність повільно видаляти воду ускладнює підвищення продуктивності. Попри цей метод широко застосовують для систем із поліолами, природними волокнами, мінеральними наповнювачами та іншими полімерами [15–18].

Екструзія, на відміну від лабораторного лиття, дає можливість безперервно переробляти композицію. У шнековій зоні матеріал одночасно нагрівається, стискається і зазнає зсуву; за достатньої пластифікації при цьому формується термопластична фаза [16, 18]. Одержаний екструдат може бути проміжним матеріалом або одразу надходити на подальше формування листа, рукава чи іншого виробу [18, 19].

Коли потрібен пористий матеріал, екструзію поєднують зі спінуванням. Структура піни чутлива до складу суміші, її вологості, температурного профілю, швидкості обертання шнека та геометрії фільтри [18]. Так, В. Abbès та співавтори [20] застосовували двошнекову екструзію до композиції картопляного крохмалю з буряковим жомом і показали, що властивості піноматеріалу залежать, серед іншого, від відносної вологості під час випробування.

Компресійне формування базується на ущільненні композиції у формі під дією температури й тиску. Конкретний режим визначають відповідно до геометрії виробу та структури, яку необхідно отримати [18].

В ультразвуковому компресійному формуванні нагрівання і з'єднання гранул відбуваються локально завдяки ультразвуковим коливанням під тиском. М. Teil та співавтори [21] встановили, що початкова кристалічність крохмалю під час такої обробки переважно втрачається. Водночас зразки відрізнялися за залишковою та індукованою кристалічністю, тому процес не можна описати лише як утворення повністю однорідної матриці.

Лиття під тиском використовують для формування деталей у замкненій формі під тиском. М. Alonso-González та співавтори [22] використали 55 мас. % рисових висівок і 45 мас. % суміші води з гліцерином за їх співвідношення 2:1. Після змішування за температури 80 °C упродовж 1 год композицію витримували до стабілізації вмісту вологи, а потім формували за температур 100, 130 і 150 °C. Підвищення температури супроводжувалось збільшенням міцності при розтягуванні (з 12 ± 7 МПа при 100 °C до 33 ± 6 МПа при 150 °C) та видовженням при розриві (з $1,1 \pm 0,3$ до $2,4 \pm 0,3$ %), а водопоглинання, навпаки, зменшувалось (з 254 до 137%). Важливо, однак, що досліджена сировина була багатокомпонентною і містила не лише крохмаль, а й білки, тому ці результати не можна безпосередньо переносити на чистий крохмаль.

Під час плівкового видування композицію екструдують через кільцеву фільтру, після чого утворений рукав роздувають і витягують. Стабільність процесу залежить від достатньої міцності розплаву та узгодження режимів екструзії з охолодженням. У крохмальних системах необхідної реологічної поведінки досягають добором пластифікаторів, введенням армувальних компонентів або змішуванням крохмалю з іншими полімерами [17, 19].

Окремим напрямом є формування крохмальних волокон. В огляді S. Temesgen та співавторів [23] розглянуто мокре і сухе формування волокон із розчинів, а також формування з розплаву і електроформування. Для електроформування властивості отриманої волокнистої структури залежить від складу полімерного розчину та параметрів електричного поля.

Щоб наочно зіставити можливості та обмеження цих підходів, основні характеристики способів формування матеріалів на основі крохмалю наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняння основних технологій формування полімерних матеріалів
на основі крохмалю**

№	Метод формування	Ключова технологічна ознака	Переваги та обмеження	Посилання
1	Формування з розчину або дисперсії	Після желатинізації композицію заливають у форму або наносять на підкладку, а потім висушують	Зручний для лабораторного одержання тонких плівок. Водночас тривале сушіння може призводити до усадки та нерівномірної товщини	[15–18]
2	Екструзія та формування плівки методом роздуву	Композиція одночасно піддається нагріванню, тиску та зсуву в шнековій зоні; для одержання плівки композицію екструдують через кільцеву фільтру, після чого рукав роздувають і витягують	Метод придатний до безперервного процесу й масштабування, але потребує контролю вологості, температурного профілю та інтенсивності зсуву. Для TPS при цьому особливо важлива достатня міцність розплаву	[16–20]

Продовження табл. 1

№	Метод формування	Ключова технологічна ознака	Переваги та обмеження	Посилання
3	Ультразвукове або компресійне пресування	Нагріту крохмальну композицію формують під тиском; в ультразвуковому варіанті додатково діють коливання	Дає змогу отримувати щільні листові або об'ємні зразки. Процес є періодичним, а результат чутливий до температури, тиску й тривалості оброблення	[18, 21]
4	Лиття під тиском	Термопластичну композицію під тиском подають у форму	Підходить для виробів складної геометрії, однак потребує стабільної течії композиції та обладнання для роботи під тиском	[18, 22]
6	Формування волокон або електроформування	Із розчинів або дисперсій формують волокнисті структури	Метод дає мікро- та нано-волокнисті структури, однак не є типовим способом одержання звичайної пакувальної плівки	[23]

Пластифікатори. Е. Basiak та співавтори [7] досліджували зразки, отримані з 5 г пшеничного крохмалю і 100 мл води, нагрівали отриману дисперсію за температури 85 °С впродовж 30 хв, після чого охолоджували до 40 °С і додавали гліцерин до отримання масових співвідношень гліцерин:крохмаль 0,3:1 та 0,5:1. Середні значення міцності при розтягуванні для отриманих плівок дорівнювали $3,29 \pm 0,79$ та $2,10 \pm 0,76$ МПа, а видовження при розриві – $15,21 \pm 5,88$ та $18,08 \pm 5,40\%$. Напрямок зміни показників був характерним для пластифікації, але ці відмінності, за висновком авторів роботи, не були статистично значущими. Натомість зі збільшенням частки гліцерину погіршувалися бар'єрні властивості щодо водяної пари та кисню. У плівках із крохмалю маранти J. Tarique та співавтори [8] одержали виразніше зниження міцності разом зі збільшенням видовження при розриві. Вони дослідили 0, 15, 30 і 45 г гліцерину на 100 г крохмалю маранти, додаючи гліцерин після клейстеризації крохмалю. Отримані результати показали, що при переході від 15 до 45 г гліцерину міцність при розтягуванні зменшилась з 9,34 до 1,95 МПа, а видовження отриманих плівок при розриві навпаки зросло – з 2,41 до 57,33%.

Отже, загальна тенденція в обох роботах подібна, проте величина ефекту та статистична переконливість результатів різняться. Пластифікатор підвищує рухливість полісахаридних ланцюгів і полегшує перероблення крохмалю, але кінцевий результат визначається його природою, концентрацією та станом матриці. Зростання деформативності при цьому може супроводжуватися меншою жорсткістю і слабшим бар'єром для вологи [4, 5, 7, 8].

М.К. Marichelvam та співавтори [13], зберігаючи сталими кількості гліцерину, кислоти лимонної й желатину, змінювали співвідношення рисового та кукурудзяного крохмалю їх за співвідношенням від 5:5 до 7:3. У межах цієї серії міцність зростала разом зі збільшенням частки рисового крохмалю. Зразок S5, який містив у складі 7 г рисового крохмалю, 3 г кукурудзяного крохмалю, 3 г гліцерину, 1 г кислоти лимонної, 2 г желатину та 100 г води, за наведеними авторами підсумковими показниками, мав найнижчий відсотковий показник розчинності у воді на рівні 11,5%, хоча послідовного зниження цих величин від зразка до зразка у серії не спостерігалось. При цьому, у цій же серії було визначено послідовне зростання міцності при розтягуванні від 6,11 МПа для зразка S1 до 12,5 МПа для зразка S5, і відповідно зросло їх видовження при розриві – від 3,38 до 6,8%.

Хімічна модифікація та зшивання. К. Wilpiszewska та співавтори [24] одержували плівки з карбоксиметильованого крохмалю зі ступенем заміщення 0,8. У 100 мл води спочатку розчиняли кислоту лимонну й 2 г гліцерину, потім вносили 3 г крохмалю. Досліджували плівки за вмісту кислоти лимонної у відсоткових співвідношеннях 15, 30, 45 та 60% від маси крохмалю. Найкращі механічні показники у серії були отримані за вмісту кислоти 30% – міцність при розтягуванні становила 160 кПа. За вищих концентрацій кислоти погіршення механічних властивостей автори пояснювали можливим гідролізом полімерних ланцюгів.

Для системи крохмаль маніюки-гліцерин-кислота лимонна P.G. González Seligra та співавтори [25] зафіксували зниження проникності водяної пари (WVP) і стримування ретроградації. Вираженість ефекту залежала від температури желатинізації: для зразків із кислотою лимонною WVP зменшувалася приблизно на 36 % при 75 °C і на 17,2 % при 85 °C, тобто підвищення температури до 85 °C послаблювало бар'єрний ефект порівняно з 75 °C. При цьому карбоксиметильований і нативний крохмаль відрізняються за хімічною будовою, тому умови, ефективні в роботах [24] і [25], не можна вважати взаємозамінними.

Наповнювачі та нанокомпозити. У роботі Q. Sun та співавторів [9] для отримання плівок використовували 7,5 г кукурудзяного крохмалю, 3 г гліцерину та 100 мл води. Наночастинки CaCO_3 попередньо диспергували ультразвуком у 50 мл води, після чого вводили у крохмальну суміш, змінюючи при цьому вміст наповнювача від 0,02 до 0,5% від маси сухого крохмалю і порівнювали з плівкою без внесеного наповнювача. За 0,06% наповнювача міцність плівки при розтягуванні зросла від 1,40 до 2,24 МПа, а її видовження при розриві від 79,21 до 118,98%. Однак залежність міцності від концентрації не була лінійною: після досягнення максимуму подальше введення частинок погіршувало результат. Автори пов'язали це з агрегацією наповнювача та розділенням фаз.

В огляді K.E. Rivadeneira-Velasco та співавторів [5] для багатьох TPS-нанокомпозитів описано іншу поширену картину – зростання модуля і міцності при одночасному зменшенні видовження при розриві. Втім, це не універсальна закономірність для всіх композицій, що добре видно на прикладі результатів Q. Sun [9]. Вирішальними залишаються сумісність наповнювача з матрицею та якість його диспергування.

Походження крохмалю та склад матриці. Z. Żolek-Tryznowska та Kałuża [10] порівнювали плівки з 10 г кукурудзяного, картопляного, вівсяного, рисового або тапіокового крохмалю, 5 г гліцерину та 200 г води. Суміш нагрівали до 95 °C, витримували протягом 5 хв і перед нанесенням охолоджували до 50 °C. Навіть за однакової рецептури та процесу отримані матеріали з різних видів крохмалів відрізнялися за механічними, бар'єрними й поверхневими характеристиками. Найбільшу міцність при розтягуванні показала плівка з картопляного крохмалю ($3,05 \pm 0,66$ МПа), а найнижчу було встановлено для плівки з вівсяного крохмалю ($0,36 \pm 0,05$ МПа). Якщо казати про видовження при розриві, то найбільше значення було визначено для тапіокового крохмалю ($137 \pm 5\%$), тоді як найменше – для вівсяного ($27 \pm 5\%$). Отримані у даному дослідженні результати надають змогу обґрунтувати вибір картопляного крохмалю за пріоритету міцності, а тапіокового за пріоритету деформативності у межах дослідженої рецептури.

У наступній роботі Z. Żolek-Tryznowska та співавтори [26] розглядали кукурудзяні й картопляні крохмальні плівки вже як підкладки для струменевого друку. Крім механічних властивостей, автори визначали поверхневу енергію, шорсткість і якість відбитків. У використаній системі друку плівки виявилися придатними для нанесення тексту, піктограм і QR-кодів.

Основні наслідки введення добавок і застосування різних способів модифікації зведено в табл. 2. Ці ефекти описують конкретні композиції, досліджені у відповідних роботах, і не повинні трактуватися як готова універсальна рецептура.

Таблиця 2

**Узагальнення впливу основних компонентів на властивості
полімерних матеріалів на основі крохмалю**

№	Компонент/підхід	Основний ефект	Потенційний недолік	Посилання
1	Гліцерин	Підвищує рухливість полімерних ланцюгів і деформативність матеріалу	За високого вмісту може знижуватися жорсткість і погіршуватися бар'єр для вологи	[7, 8]
2	Сорбітол	Виконує роль пластифікатора та впливає на жорсткість і водні властивості	Характер змін залежить від співвідношення з іншими пластифікаторами	[27, 28]
3	Кислота лимонна	Може забезпечувати зшивання, знижувати проникність водяної пари (WVP) і стримувати ретроградацію	За надмірного вмісту кислоти можливий гідроліз полімерних ланцюгів	[24, 25]
4	CaCO ₃ або інші нанонаповнювачі	За належної сумісності з матрицею може підвищувати міцність і модуль та поліпшувати бар'єрні властивості	Надлишок наповнювача може сприяти агломерації частинок і появи дефектів диспергування	[5, 9]
5	Зміна джерела крохмалю	Ботанічне походження крохмалю впливає на механічні, водні та поверхневі властивості матеріалу	Результати для одного виду крохмалю не варто безпосередньо переносити на інший	[10, 13]
6	Окиснення	Дас змогу регулювати функціональні групи, а також механічні й водні характеристики	Ступінь окиснення потребує контролю	[12]

Сучасні функціональні крохмальні матеріали. S. Lepak-Kuc та співавтори [29] використали плівки з картопляного крохмалю і гліцерину як гнучкі підкладки для трафаретного друку електропровідними пастами на основі нанокарбону. У цій системі електропровідність забезпечувалася саме нанесеним функціональним шаром, а не крохмальною матрицею.

M.A. Chowdhury та співавтори [30] працювали з плівками з рослинної сировини, до складу якої входили компоненти насіння тамаринду, ягідного насіння та кореня солодки. Серед досліджених характеристик була антимікробна активність щодо мікроорганізмів *S. aureus* та *E. coli*. Оскільки матеріал мав складну рослинну композицію, одержану антимікробну дію некоректно приписувати лише крохмалю.

Біорозкладання полімерних матеріалів на основі крохмалю. M.K. Gurunathan та співавтори [28] порівнювали крохмальні композиції з гліцерином, сорбітолом і CaCO₃ та використали метод Тагучі, щоб вибрати найкращий варіант серед досліджених складів. У обраному ними варіанті використано 9 г кукурудзяного крохмалю, 9 мл гліцерину, 2,5 г CaCO₃. Визначений ними оптимум стосується саме цієї експериментальної серії. Крім того, показник, названий у статті біорозкладанням, автори оцінювали за втратою маси після витримання у ґрунті; такий тест характеризує лише фізичне руйнування зразка, але не є прямим вимірюванням повного біологічного розкладу.

M.M. Abe, M.C. Branciforti та M. Brienzo [11] у своєму огляді пов'язують швидкість розкладання біопластиків із хімічною будовою, морфологією, доступом води та складом мікробної спільноти; окремо розглядаються й обмеження методу втрати маси. Через це

результати, одержані в різних ґрунтах або компостах, не завжди можна прямо порівнювати. А. Shafqat та співавтори [27] досліджували матеріали з крохмалю бананової шкірки та його сумішей із кукурудзяним і рисовим крохмалю, використовуючи гліцерин, сорбітол і природні наповнювачі. Склад впливав на механічні властивості, вологість, водопоглинання та розчинність; у ґрунтовому тесті автори визначали втрату маси зразків. Ці дані описують руйнування матеріалу за конкретних умов, але не підтверджують повного біологічного розкладу.

Той самий матеріал може виглядати по-різному залежно від критерію, за яким оцінюють його розкладання. Це наочно демонструє робота [12], де результати фізичного руйнування не збігалися за змістом з оцінкою за споживанням кисню.

Порівняння досліджень і невирішені питання. Роботи Е. Basiak [7] і J. Tarique [8] добре показують, чому однаковий напрям зміни середніх значень ще не означає однакової доказовості ефекту. У Е. Basiak механічні зміни не досягли статистичної значущості, тоді як у Tarique зниження міцності та модуля було вираженим. Для наповнених систем ситуація так само неоднозначна: підвищення жорсткості може супроводжуватися як зменшенням, так і збільшенням видовження при розриві [5, 9].

Під час оцінювання взаємодії плівки з водою особливо важливо називати конкретний показник. У J. Tarique, наприклад, зі збільшенням вмісту гліцерину водопоглинання зменшувалося, але розчинність і проникність для водяної пари зростали [8]. Тому узагальнена фраза про «підвищення водостійкості» тут була б неточною. Те саме стосується зшитих і наповнених композицій: висновок має відповідати саме тому тесту, який був проведений [9, 24, 25].

У новіших публікаціях помітно розширюється спектр завдань, для яких модифікують крохмальні матеріали: від регулювання поведінки у водному середовищі [12] і добору складу за комплексом властивостей [28] до друку електропровідних структур [29]. N. Lawal та співавтори [31] пов'язують подальший розвиток біопластиків на основі крохмалю із модифікацією матриці, аналітичним контролем і подоланням технологічних обмежень. Водночас такі напрями самі по собі ще не доводять безпечність усіх продуктів розкладання матеріалу.

Аналіз використаних даних наукової літератури дає підстави вважати, що найперспективнішим способом промислової переробки полімерних матеріалів на основі крохмалю є отримання термопластичного крохмалю методом екструзії. Але при розробці відповідних рецептур окремою проблемою залишається масштабування. Рецепт, що добре поводить під час лабораторного лиття, не гарантує аналогічної стабільності процесу та якості виробів при плоскоциліндній екструзії листа або екструзійно-видувному формуванні плівки [19]. Тому при зіставленні плівок окрім їх складу та процесу отримання, потрібно враховувати також товщину, вологість і режим кондиціонування [7, 10], а в дослідях із розкладання – середовище, тривалість і спосіб визначення кінцевого показника [11, 12].

Висновки:

1. Проведений аналіз показав, що походження полімеру та його здатність до біорозкладання є різними критеріями класифікації. Тому твердження про біорозкладність має супроводжуватися зазначенням середовища та умов, у яких її визначали.

2. Встановлено, що крохмаль є доступною відновлюваною сировиною для біорозкладних полімерних матеріалів, однак нативна структура обмежує його термопластичність, механічні властивості та стійкість до дії води. Одержання термопластичного крохмалю потребує пластифікації та термомеханічної обробки за рахунок введення до складу пластифікаторів, тоді як введення наповнювачів, зшивальних агентів та інших модифікувальних компонентів надає можливість додатково регулювати механічні, бар'єрні й водні властивості одержаних матеріалів.

3. Визначено, що розбіжності між результатами різних досліджень пов'язані з ботанічним походженням крохмалю, співвідношенням амілози й амілопектину, природою та концентрацією пластифікатора, іншими добавками, способом формування і режимом випробування. Абсолютні значення властивостей коректно зіставляти насамперед для близьких експериментальних умов.

4. Проведений комплексний аналіз показав, що для багатокомпонентних матеріалів на основі крохмалю немає одного універсального критерію оптимальності. Їхній склад необхідно підбирати з урахуванням механічних, бар'єрних і технологічних вимог до конкретного виробу. Для модифікації полімерних матеріалів на основі крохмалів (кукурудзяного, картопляного, тапіокового) доцільним є введення пластифікаторів (гліцерин, сорбітол), а також наповнювачів (CaCO_3 , нановолокна целюлози) і зшивальних агентів (кислоти лимонна, яблучна).

Подальші роботи будуть спрямовані не лише на пошук нових рецептур, а й на масштабування лабораторних технологій, стандартизацію випробувань біорозкладання, оцінку довготривалої стабільності та кінцевих продуктів розкладання, з урахуванням принципів зеленої хімії.

References

1. Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable Polymers. *Materials*, 2(2), 307–344. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma2020307>.
2. Bose, A., Paul, S., Mukherjee, S., Majumdar, S., Dey, S., & Chakraborty, M. (2026). Bio-degradable polymers through green chemistry: advances, applications, and future perspectives. *Discover Chemistry*, (3), 282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44371-026-00727-0>.
3. Dallaev, R., Papež, N., Allaham, M. M., & Holcman, V. (2025). Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact. *Polymers*, 17(14), 1981. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17141981>.
4. Diyana, Z. N., Jumaidin, R., Selamat, M. Z., Ghazali, I., Julmohammad, N., Huda, N., & Ilyas, R. A. (2021). Physical Properties of Thermoplastic Starch Derived from Natural Resources and Its Blends: A Review. *Polymers*, 13(9), 1396. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13091396>.
5. Rivadeneira-Velasco, K. E., Utreras-Silva, C. A., Díaz-Barrios, A., Sommer-Márquez, A. E., Tafur, J. P., & Michell, R. M. (2021). Green Nanocomposites Based on Thermoplastic Starch: A Review. *Polymers*, 13(19), 3227. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13193227>.
6. Bangar, S. P., Whiteside, W. S., Ashogbon, A. O., & Kumar, M. (2021). Recent advances in thermoplastic starches for food packaging: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 30, 100743. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100743>.
7. Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2018). How Glycerol and Water Contents Affect the Structural and Functional Properties of Starch-Based

Література

1. Vroman I., Tighzert L. Biodegradable Polymers. *Materials*. 2009. Vol. 2, No. 2. P. 307–344. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma2020307>.
2. Bose A., Paul S., Mukherjee S., Majumdar S., Dey S., Chakraborty M. Bio-degradable polymers through green chemistry: advances, applications, and future perspectives. *Discover Chemistry*. 2026. Vol. 3. Art. 282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44371-026-00727-0>.
3. Dallaev R., Papež N., Allaham M. M., Holcman V. Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact. *Polymers*. 2025. Vol. 17, No. 14. Art. 1981. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17141981>.
4. Diyana Z. N., Jumaidin R., Selamat M. Z., Ghazali I., Julmohammad N., Huda N., Ilyas R. A. Physical Properties of Thermoplastic Starch Derived from Natural Resources and Its Blends: A Review. *Polymers*. 2021. Vol. 13, No. 9. Art. 1396. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13091396>.
5. Rivadeneira-Velasco K. E., Utreras-Silva C. A., Díaz-Barrios A., Sommer-Márquez A. E., Tafur J. P., Michell R. M. Green Nanocomposites Based on Thermoplastic Starch: A Review. *Polymers*. 2021. Vol. 13, No. 19. Art. 3227. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13193227>.
6. Bangar S. P., Whiteside W. S., Ashogbon A. O., Kumar M. Recent advances in thermoplastic starches for food packaging: A review. *Food Packaging and Shelf Life*. 2021. Vol. 30. Art. 100743. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100743>.
7. Basiak E., Lenart A., Debeaufort F. How Glycerol and Water Contents Affect the Structural and Functional Properties of Starch-Based Edible Films.

- Edible Films. *Polymers*, 10(4), 412. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10040412>.
8. Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11, 13900. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>.
9. Sun, Q., Xi, T., Li, Y., & Xiong, L. (2014). Characterization of Corn Starch Films Reinforced with CaCO₃ Nanoparticles. *PLOS ONE*, 9(9), e106727. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106727>.
10. Żołek-Tryznowska, Z., & Kałuża, A. (2021). The Influence of Starch Origin on the Properties of Starch Films: Packaging Performance. *Materials*, 14(5), 1146. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051146>.
11. Abe, M. M., Branciforti, M. C., & Brienzo, M. (2021). Biodegradation of Hemicellulose-Cellulose-Starch-Based Bioplastics and Microbial Polyesters. *Recycling*, 6(1), 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6010022>.
12. Chua, S. T., Hsu, Y.-I., Soni, R., & Uyama, H. (2026). Starch-Based Bioplastic with Controlled Physical Properties and Marine Decomposition. *Polymer Degradation and Stability*, 249, 112130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2026.112130>.
13. Marichelvam, M. K., Jawaid, M., & Asim, M. (2019). Corn and Rice Starch-Based Bio-Plastics as Alternative Packaging Materials. *Fibers*, 7(4), 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib7040032>.
14. Zarski, A., Bajer, K., & Kapuśniak, J. (2021). Review of the Most Important Methods of Improving the Processing Properties of Starch toward Non-Food Applications. *Polymers*, 13(5), 832. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13050832>.
15. Bangar, S. P., Purewal, S. S., Trif, M., Maqsood, S., Kumar, M., Manjunatha, V., & Rusu, A. V. (2021). Functionality and Applicability of Starch-Based Films: An Eco-Friendly Approach. *Foods*, 10(9), 2181. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10092181>.
16. Tosif, M. M., Najda, A., Bains, A., Zawislak, G., Maj, G., & Chawla, P. (2021). Starch–Mucilage Composite Films: An Inclusive on Physicochemical and Biological Perspective. *Polymers*, 13(16), 2588. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162588>.
17. Muñoz-Gimena, P. F., Oliver-Cuenca, V., Peponi, L., & López, D. (2023). A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging. *Polymers*, 15(13), 2972. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15132972>.
- Polymers*. 2018. Vol. 10, No. 4. Art. 412. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10040412>.
8. Tarique J., Sapuan S. M., Khalina A. Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Art. 13900. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>.
9. Sun Q., Xi T., Li Y., Xiong L. Characterization of Corn Starch Films Reinforced with CaCO₃ Nanoparticles. *PLOS ONE*. 2014. Vol. 9, No. 9. Art. e106727. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106727>.
10. Żołek-Tryznowska Z., Kałuża A. The Influence of Starch Origin on the Properties of Starch Films: Packaging Performance. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 5. Art. 1146. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051146>.
11. Abe M. M., Branciforti M. C., Brienzo M. Biodegradation of Hemicellulose-Cellulose-Starch-Based Bioplastics and Microbial Polyesters. *Recycling*. 2021. Vol. 6, No. 1. Art. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6010022>.
12. Chua S. T., Hsu Y.-I., Soni R., Uyama H. Starch-Based Bioplastic with Controlled Physical Properties and Marine Decomposition. *Polymer Degradation and Stability*. 2026. Vol. 249. Art. 112130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2026.112130>.
13. Marichelvam M. K., Jawaid M., Asim M. Corn and Rice Starch-Based Bio-Plastics as Alternative Packaging Materials. *Fibers*. 2019. Vol. 7, No. 4. Art. 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib7040032>.
14. Zarski A., Bajer K., Kapuśniak J. Review of the Most Important Methods of Improving the Processing Properties of Starch toward Non-Food Applications. *Polymers*. 2021. Vol. 13, No. 5. Art. 832. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13050832>.
15. Bangar S. P., Purewal S. S., Trif M., Maqsood S., Kumar M., Manjunatha V., Rusu A. V. Functionality and Applicability of Starch-Based Films: An Eco-Friendly Approach. *Foods*. 2021. Vol. 10, No. 9. Art. 2181. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10092181>.
16. Tosif M. M., Najda A., Bains A., Zawislak G., Maj G., Chawla P. Starch–Mucilage Composite Films: An Inclusive on Physicochemical and Biological Perspective. *Polymers*. 2021. Vol. 13, No. 16. Art. 2588. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162588>.
17. Muñoz-Gimena P. F., Oliver-Cuenca V., Peponi L., López D. A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 13. Art. 2972. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15132972>.

18. Falua, K. J., Pokharel, A., Babaei-Ghazvini, A., Ai, Y., & Acharya, B. (2022). Valorization of Starch to Biobased Materials: A Review. *Polymers*, 14(11), 2215. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14112215>.
19. Garavito, J., Peña-Venegas, C. P., & Castellanos, D. A. (2024). Production of Starch-Based Flexible Food Packaging in Developing Countries: Analysis of the Processes, Challenges, and Requirements. *Foods*, 13(24), 4096. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13244096>.
20. Abbès, B., Lacoste, C., Bliard, C., Maalouf, C., Simescu-Lazar, F., Bogard, F., & Polidori, G. (2020). Novel Extruded Starch-Beet Pulp Composites for Packaging Foams. *Materials*, 13(7), 1571. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13071571>.
21. Teil, M., Regazzi, A., Harthong, B., Dumont, P. J. J., Imbault, D., Putaux, J. L., & Peyroux, R. (2021). Manufacturing of starch-based materials using ultrasonic compression moulding (UCM): toward a structural application. *Heliyon*, 7(3), e06482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06482>.
22. Alonso-González, M., Felix, M., Guerrero, A., & Romero, A. (2021). Effects of Mould Temperature on Rice Bran-Based Bioplastics Obtained by Injection Moulding. *Polymers*, 13(3), 398. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13030398>.
23. Temesgen, S., Rennert, M., Tesfaye, T., & Nase, M. (2021). Review on Spinning of Biopolymer Fibers from Starch. *Polymers*, 13(7), 1121. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13071121>.
24. Wilpiszewska, K., Antosik, A. K., & Zdanowicz, M. (2019). The Effect of Citric Acid on Physicochemical Properties of Hydrophilic Carboxymethyl Starch-Based Films. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 1379–1387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01436-9>.
25. Seligra, P. G., Medina Jaramillo, C., Famá, L., & Goyanes, S. (2016). Biodegradable and non-retrogradable eco-films based on starch–glycerol with citric acid as crosslinking agent. *Carbohydrate Polymers*, 138, 66–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.041>.
26. Żółek-Tryznowska, Z., Piłczyńska, K., Murawski, T., Jeznach, A., & Niczyporuk, K. (2024). Study on the Printability of Starch-Based Films Using Ink-Jet Printing. *Materials*, 17(2), 455. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17020455>.
27. Shafqat, A., Al-Zaqri, N., Tahir, A., & Alsalmeh, A. (2021). Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(3), 1739–1749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.015>.
18. Falua K. J., Pokharel A., Babaei-Ghazvini A., Ai Y., Acharya B. Valorization of Starch to Biobased Materials: A Review. *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 11. Art. 2215. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14112215>.
19. Garavito J., Peña-Venegas C. P., Castellanos D. A. Production of Starch-Based Flexible Food Packaging in Developing Countries: Analysis of the Processes, Challenges, and Requirements. *Foods*. 2024. Vol. 13, No. 24. Art. 4096. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13244096>.
20. Abbès B., Lacoste C., Bliard C., Maalouf C., Simescu-Lazar F., Bogard F., Polidori G. Novel Extruded Starch-Beet Pulp Composites for Packaging Foams. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 7. Art. 1571. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13071571>.
21. Teil M., Regazzi A., Harthong B., Dumont P. J. J., Imbault D., Putaux J. L., Peyroux R. Manufacturing of starch-based materials using ultrasonic compression moulding (UCM): toward a structural application. *Heliyon*. 2021. Vol. 7, No. 3. Art. e06482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06482>.
22. Alonso-González M., Felix M., Guerrero A., Romero A. Effects of Mould Temperature on Rice Bran-Based Bioplastics Obtained by Injection Moulding. *Polymers*. 2021. Vol. 13, No. 3. Art. 398. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13030398>.
23. Temesgen S., Rennert M., Tesfaye T., Nase M. Review on Spinning of Biopolymer Fibers from Starch. *Polymers*. 2021. Vol. 13, No. 7. Art. 1121. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13071121>.
24. Wilpiszewska K., Antosik A. K., Zdanowicz M. The Effect of Citric Acid on Physicochemical Properties of Hydrophilic Carboxymethyl Starch-Based Films. *Journal of Polymers and the Environment*. 2019. Vol. 27. P. 1379–1387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01436-9>.
25. Seligra P. G., Medina Jaramillo C., Famá L., Goyanes S. Biodegradable and non-retrogradable eco-films based on starch–glycerol with citric acid as crosslinking agent. *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 138. P. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.041>.
26. Żółek-Tryznowska Z., Piłczyńska K., Murawski T., Jeznach A., Niczyporuk K. Study on the Printability of Starch-Based Films Using Ink-Jet Printing. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 2. Art. 455. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17020455>.
27. Shafqat A., Al-Zaqri N., Tahir A., Alsalmeh A. Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2021. Vol. 28, No. 3. P. 1739–1749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.015>.

28. Gurunathan, M. K., Navasingh, R. J. H., Selvam, J. D. R., & Čep, R. (2025). Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging. *Scientific Reports*, 15, 15264. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00221-0>.
29. Lepak-Kuc, S., Kądziela, A., Staniszevska, M., Janczak, D., Jakubowska, M., Bednarczyk, E., Murawski, T., Piłczyńska, K., & Żółek-Tryznowska, Z. (2024). Sustainable, cytocompatible and flexible electronics on potato starch-based films. *Scientific Reports*, 14, 18838. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69478-1>.
30. Chowdhury, M. A., Hossain, N., Badrudduza, M. D., & Rana, M. M. (2023). Development and characterization of natural sourced bioplastic for food packaging applications. *Heliyon*, 9(2), e13538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13538>.
31. Lawal, N., Adeleke, A., Nzerem, P., Adewumi, C., Ogundolie, F., Anosike-Francis, E., Adeleke, W., & Jesuloluwa, S. (2026). Recent Advances, Challenges, and Analytical Perspectives in Starch-Based Bioplastics. *Journal of Renewable Materials*, 14(7), 5. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2026.02025-0203>.
28. Gurunathan M. K., Navasingh R. J. H., Selvam J. D. R., Čep R. Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 15264. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00221-0>.
29. Lepak-Kuc S., Kądziela A., Staniszevska M., Janczak D., Jakubowska M., Bednarczyk E., Murawski T., Piłczyńska K., Żółek-Tryznowska Z. Sustainable, cytocompatible and flexible electronics on potato starch-based films. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 18838. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69478-1>.
30. Chowdhury M. A., Hossain N., Badrudduza M. D., Rana M. M. Development and characterization of natural sourced bioplastic for food packaging applications. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 2. Art. e13538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13538>.
31. Lawal N., Adeleke A., Nzerem P., Adewumi C., Ogundolie F., Anosike-Francis E., Adeleke W., Jesuloluwa S. Recent Advances, Challenges, and Analytical Perspectives in Starch-Based Bioplastics. *Journal of Renewable Materials*. 2026. Vol. 14, No. 7. Art. 5. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2026.02025-0203>.

SHKARLAT PAVLO

PhD Student,
Department of Biotechnology and Life Safety,
Ukrainian State University of Science and Technologies
SEI "Ukrainian State University of Chemical
Technology", Dnipro, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-5482-1883>
E-mail: pavelshkarlat99@gmail.com

GARMASH SVITLANA

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Department of Biotechnology and Life Safety,
Ukrainian State University of Science and Technologies
SEI "Ukrainian State University of Chemical
Technology", Dnipro, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2658-162X>
Scopus Author ID: 57204916677
E-mail: svqarmash@ukr.net

Pavlo SHKARLAT, Svitlana GARMASH

Ukrainian State University of Science and Technologies SEI "Ukrainian State
University of Chemical Technology", Dnipro, Ukraine

**STARCH-BASED BIODEGRADABLE POLYMER MATERIALS: CURRENT STATE,
PROPERTIES, TECHNOLOGIES AND FUTURE PROSPECTS**

Purpose. To systematize current scientific knowledge of biopolymers and biodegradable polymer materials, including their composition, processing approaches, and properties, with particular emphasis on starch as a readily available renewable raw material for producing thermoplastic starch-based films and composites.

Methodology. The review analyzes international scientific publications addressing biodegradable polymers, thermoplastic starch, plasticization and film formation, incorporation of fillers, crosslinking, as well as the mechanical and barrier properties and biodegradation of polymer materials.

Findings. The literature analysis confirms that the terms "biopolymer", "bioplastic" and "biodegradable polymer" are not interchangeable. Starch has attracted attention as a renewable and readily available raw material capable of forming films; however, in its native state, it is brittle, hygroscopic, and exhibits limited thermoplasticity. Producing a thermoplastic material requires disruption of the granular structure of starch and weakening of intermolecular interactions through the action of heat, water, and

plasticizers. In most of the studies reviewed, glycerol increased flexibility and elongation at break, whereas excessive glycerol content could reduce tensile strength and impair barrier properties. When properly dispersed, fillers and nanofillers (CaCO_3 , cellulose nanofibers, etc.) can increase tensile strength of the material and improve its barrier properties, while crosslinking with organic acids, in turn, can reduce water sensitivity and slow retrogradation.

Originality. Through a comprehensive analysis of current research addressing common processing challenges in starch-based materials, the review systematizes data on the relationships between the composition of starch-based polymer formulations, the methods used to form them, and their final mechanical, barrier, and water-related properties. The analysis shows that the effects of modifying starch-based materials should be assessed comprehensively rather than on the basis of individual parameters, taking into account the botanical origin of starch, the nature of the plasticizer, the type and concentration of the filler, and the processing conditions.

Practical value. The summarized data can be used to select an optimal formulation for starch-based films and appropriate methods for producing thermoplastic starch and composites intended for packaging and agricultural applications. Particular attention is paid to the distinction between the physical disintegration of a material and its complete biomineralization.

Keywords: polymers; biopolymers; starch; thermoplastic starch; biodegradation; technologies.