



<https://doi.org/10.15407/polymerj.48.01.003>

УДК: 539.5:678

Валентина БОЙКО

ORCID: 0000-0002-5527-0468

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

e-mail: valboyko54@gmail.com

Сергій РЯБОВ

ORCID: 0000-0003-2996-3794

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

e-mail: sergii.riabov@gmail.com

Лариса КОБРИНА

ORCID: 0000-0001-6801-0801

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

e-mail: kobrina.larisa@gmail.com

Антон ТИМОШИК

ORCID: 0009-0003-3730-1771

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

e-mail: antontimoshik9@gmail.com

Тетяна ДМИТРИЄВА

ORCID: 0000-0002-3526-8395

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

БІОДЕГРАДАБЕЛЬНІ ПОЛІМЕРИ. Частина 3. ПОЛІМЕРИ, ОТРИМАНІ З СИНТЕТИЧНИХ МОНОМЕРІВ

Оглядова стаття присвячена біорозкладним полімерам (БРП), які отримують традиційним синтезом із синтетичних мономерів. Розглянуто аліфатичні поліестери (полікапролактон, полібутиленсулцинат), аліфатично-ароматичні кополіестери (полі-(бутилен-адипат-ко-терефталат), аліфатичні поліаміди, поліамідоетери, поліуретани, поліпропілен-карбонат і полівініловий спирт. Завдяки структурним особливостям вони здатні піддаватися біологічній деструкції під впливом природних чинників за аеробних і анаеробних умов. Детально проаналізовані методи синтезу БРП, наведено схеми їх отримання з прикладами сировини, каталізаторів полімеризації, інших технологічних чинників. Описано фізичні, теплові, механічні властивості БРП залежно від їхніх молекулярної маси та ступеня кристалічності. Наведено види розчинників для цих полімерів. Показано, що

Цит у в а н н я: Бойко В., Рябов С., Кобрин Л., Тимошик А., Дмитрієва Т. Біодеградабельні полімери. Частина 3. Полімери, отримані з синтетичних мономерів. *Полімерний журнал*. 2026. **48**, № 1. С. 3—14. <https://doi.org/10.15407/polymerj.48.01.003>

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article distributed under the [CC BY-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/) licence

для поліпшення експлуатаційних характеристик отримують кополімери й суміші БРП із іншими високомолекулярними сполуками. Наведено посилання на галузі використання БРП, отриманих із синтетичних мономерів. Описано хід їх деструкції під дією біотичних чинників, зокрема наведено перелік штамів мікроорганізмів, які розкладають БРП у довіллі. В огляді проаналізовано наукові публікації, надруковані упродовж останніх десятиріч, що дає змогу зробити висновок про актуальність науково-технічного дослідження і практичного використання біорозкладних полімерів, отриманих із синтетичних мономерів.

Ключові слова: біорозкладні полімери, синтетичні мономери, полікапролактон, полібутиленсукцинат, аліфатичні поліестери, аліфатичні поліаміди, поліамідоестери, поліуретани, поліпропіленкарбонат, полівініловий спирт.

Вступ

Біорозкладні полімери (БРП) — це нове покоління високомолекулярних сполук, популярність їх застосування зумовлена екологічністю. Ринок БРП відзначається стійким розвитком і значним потенціалом у майбутньому [1—3].

Однією з ознак належності полімерних матеріалів до біорозкладних є здатність до біологічної деструкції під впливом природних чинників (гідроліз, окиснення, опромінення, дія мікроорганізмів) за аеробних і анаеробних умов. Полімери деяких видів, отримані традиційним синтезом із синтетичних мономерів, завдяки своїм структурним особливостям здатні піддаватися біологічній деструкції, зокрема поліестери, поліаміди тощо.

Аліфатичні поліестери

Полікапролактон

Найбільшого поширення серед синтетичних біорозкладних полімерів набули аліфатичні поліестери, що містять естерні групи в головному ланцюзі або в бічних групах. Зазвичай їх отримують методами гомополіконденсації оксикарбонових кислот чи гетерополіконденсації дикарбонових кислот із гліколями, або шляхом полімеризації з розкриттям подвійного зв'язку чи циклу.

Представником біодеградабельних поліестерів є полікапролактон (ПКЛ), який складається з гексаноатних повторюваних одиниць [4].

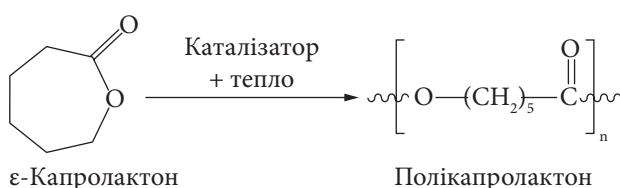


Рис. 1. Схема полімеризації полікапролактону з ϵ -капролактону

Існують два методи отримання ПКЛ: поліконденсацією 6-гідрокси-капронової (6-гідроксигексанової) кислоти або шляхом розкриття кільця ϵ -капролактону і подальшої полімеризації при нагріванні з каталізатором (рис. 1). Як каталізатор можна використовувати метали, ферменти чи інші органічні системи [4].

Полікапролактон — напівкристалічний полімер, ступінь кристалічності якого може досягати 69 %. Залежно від параметрів синтезу й типу каталізатора різні партії ПКЛ різняться молекулярною масою, яка лежить у діапазоні 530—630 000 г/моль. Фізичні, теплові й механічні властивості ПКЛ залежать від його молекулярної маси та ступеня кристалічності. Так густина змінюється в діапазоні 1,071—1,200 г/см³, температура склування від -65 до -60 °С, температура плавлення 56—65 °С, модуль Юнга 0,21—0,44 ГПа, міцність при розтягуванні 4—785 МПа, відносно подовження при розриві 20—1000 % [4, 5].

За кімнатної температури ПКЛ добре розчиняється у хлороформі, дихлорметані, чотиріхлористому вуглеці, бензолі, толуолі, циклогексаноні й 2-нітропропані; малорозчинний в ацетоні, 2-бутаноні, етилацетаті, диметилформаміді й ацетонітрилі; нерозчинний у спиртах, петролейному етері, діетиловому етері й у воді. ПКЛ демонструє рідкісну властивість змішуватися з багатьма іншими полімерами (наприклад полівінілхлоридом, полістирол акрилонітрилом, поліакрилонітрил-бутадієн-стиролом, полібісфенолом-А та іншими полікарбонатами, нітроцелюлозою і бутиратцелюлозою, а також він механічно сумісний з іншими полімерами, такими як поліетилен, поліпропілен, натуральний каучук, полівінілацетат і поліетилен-пропіленовий каучук.

Широка гама фізико-механічних властивостей, змішуваність з іншими полімерами, контрольована здатність до розкладання, біосумісність і можливість синтезу з мономерів, отриманих з відновлюваних джерел (ϵ -капро-

з 1,6-гександіаміном — підвищується змочувальність поверхні зразків; з тіогліколатом — поліпшується термічна стабільність, зменшується молекулярна маса, підвищується гідрофільність поверхні; з тіодіетиленсукцинатом — збільшується кристалічність, зростає швидкість біодеградації; з терефталатом — збільшується міцність, зростає термічна стабільність [10].

Термічні властивості ПБС дають змогу переробляти цей полімер методами лиття під тиском і термоформування. Його широко застосовують для виробництва упаковки, піноматеріалів, плівки харчової та сільськогосподарської, одноразового посуду й медичних виробів, матеріалів з контрольованим вивільненням пестицидів і добрив, рибальських сіток тощо [11].

Полібутиленсукцинат належить до біологічно розкладних полімерів, які руйнуються грибами й бактеріями за природних умов у аеробному та анаеробному середовищах — у ґрунті, воді, активному мулі та компості [12].

Крім гомополіестерів відомі біодеградабельні статистичні та блокові кополіестери. У разі гетерополіконденсації вибір мономерів значно ширший: бурштинова, азелаїнова, себацинова, адипінова кислоти; 1,4-циклогександиметанол і багато інших. Всі естери отримують методом високотемпературної поліконденсації в масі за наявності каталізаторів (сполук цинку, титану, марганцю, сурми тощо).

Синтетичні аліфатичні поліестери мають кращі технологічні та експлуатаційні властивості порівняно з природними, оскільки, на відміну від природних, формуються за стабільних і контрольованих умов, тому й партії полімерів однорідні за показниками.

Аліфатично-ароматичні кополіестери

Синтетичні ароматичні поліестери, такі як поліетилентерефталат, поліпропілентерефталат чи полібутилентерефталат, мають кращі експлуатаційні показники, ніж аліфатичні поліестери. Тому розроблено стратегію введення ароматичних кілець у структуру аліфатичних поліестерів (у головний ланцюг або в бічні групи) для отримання аліфатично-ароматичних поліестерів.

Аліфатично-ароматичні кополіестери отримують у вигляді статистичних кополімерів чи блок-кополімерів. Статистичні кополімери

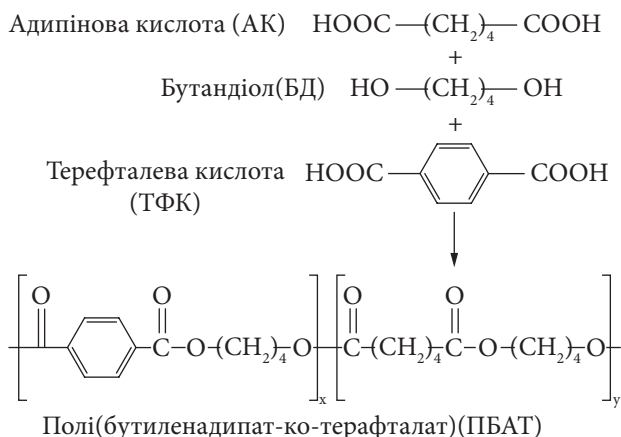


Рис. 3. Схема синтезу полі(бутиленадипат-ко-терефталату) (РВАТ, ПБАТ)

легше піддаються біодеградації, ніж кополімери з довгими ароматичними блоками.

Представником статистичного аліфатично-ароматичного кополімеру є полі(бутиленадипат-ко-терефталат) (ПБАТ, РВАТ), також відомий під торговими марками Ecoflex, Wango, Ecoworld та ін.) [13]. Згідно з даними European Bioplastics [14], у 2025 році світові виробничі потужності РВАТ становили 4,9 % від загального обсягу виробництва біопластику (2,31 млн тонн) — понад 110 тисяч тонн на рік.

Полі(бутиленадипат-ко-терефталат) зазвичай отримують методом поліконденсації адипінової кислоти (АК), бутандіолу (БД) і терефталевої кислоти, як показано на рис. 3, з використанням традиційної технології синтезу поліестерів [15].

Як каталізатори поліконденсації можуть бути використані металоорганічні сполуки на основі цинку, олова й титану. Синтез ПБАТ можна розділити на стадії попереднього змішування, попередньої полімеризації й остаточної полімеризації, він досить тривалий і потребує високого вакууму та температури вище 190 °С. Ці умови необхідні для сприяння конденсації та видалення молекул води, яка утворюється в процесі реакції. На кінцевому етапі полімеризації можна використовувати зародкових агентів для поліпшення кристалізації ПБАТ і запобігання липкості; цю функцію виконують неорганічні сполуки, такі як тальк, крейда, слюда чи оксид кремнію. Іноді на стадіях попередньої чи кінцевої полімеризації для стабілізації забарвлення додають сполуки фосфору (наприклад кислоти), це не впливає на швидкість конденсації.

Полі(бутиленадипат-ко-терефталат) — напівкристалічний полімер зі ступенем кристалічності близько 30 %. Зазвичай температура кристалізації цього полімеру становить близько 60 °С, температура плавлення 115—125 °С. Густина змінюється від 1,18 до 1,3 г/см³, твердість за Шором понад 85, міцність при розтягуванні 21—30 МПа, подовження при розриві 650—670 %, індекс текучості 4,0 г/10 хв, задовільні ударні властивості й термостійкість. Термічна стабільність і механічні властивості визначаються кількістю терефталатних (ароматичних) блоків. ПБАТ — термопластичний полімер, за технологічними властивостями подібний до поліетилену низької густини (ПЕНГ) і придатний для формування виробів на технологічному обладнанні для перероблення традиційних поліолефінів.

Полі(бутиленадипат-ко-терефталат) порівняно швидко деградує в компості, ефективно руйнується в ґрунті завдяки мікроорганізмам, які використовують вуглець у його складі і переробляють його на вуглекислий газ і біомасу [16]; виявлено, що його можуть розкласти й морські мікроорганізми [17]. Швидкість біодеградації ПБАТ залежить від ступеня кристалічності та концентрації терефталевої кислоти в полімері. Для повної біодеградації ПБАТ за природних умов оптимальний вміст терефталевої кислоти становить 30—55 мол. %.

Завдяки високим фізико-механічним характеристикам і біодеградабельним властивостям ПБАТ має широке застосування. Стійкість до впливу високої температури дає змогу використовувати його для виробництва побутової техніки, енергозбережних ламп, в автомобільній промисловості. ПБАТ не розчиняється у воді, тому ним часто покривають картон при виробництві одноразового посуду. Широко застосовують для виготовлення пакувальної харчової плівки та упаковки медичних товарів, мішків для сміття, сільськогосподарської плівки, волокон і покриттів [18, 19].

Аліфатичні поліаміди, поліамідоестери

Біодеградабельні аліфатичні поліаміди, як і поліестери, належать до найпоширеніших синтетичних БРП. Поліаміди (ПА) — полімери на основі лінійних високомолекулярних сполук,

які містять у головному ланцюзі амідні групи —CONH—, не здатні до швидкої біодеградації. Втім, цю проблему можна вирішити шляхом синтезу кополіамідів або отримання полімерів (поліпептидів) на основі α -амінокислот. Наприклад кополімер полікапроаміду з гліцином легко розкладається в довіклі, на відміну від вихідного найлону-6 [20].

Біополіаміди (БПА) — перспективний клас полімерних матеріалів, які отримують з використанням мономерів відновлюваного походження. Основною сировиною для їх синтезу слугують рослинні олії, вуглеводи та біомаса, що дає змогу зменшити залежність від нафтохімічних ресурсів і скоротити вуглецевий слід виробництва. При синтезі БПА використовують різні α -амінокислоти, діаміни й дикарбонові кислоти, зокрема й отримувані з відновлюваної сировини (похідні рицинової олії, жирні кислоти, терпени, лігніноцелюлозні матеріали тощо). БПА різних типів, а також їх синтез детально проаналізовано в оглядах [21, 22]. Так, використовуючи себацінову, адипінову, додеканову кислоти і гексаметилендіамін, 1,10-діамінодекан, отримують поліаміди марок ПА 610, ПА 1010, ПА 1012. Властивості поліамідів різних марок наведено в табл. 1 [21]. До загальноприйнятих комерційних поліамідів на біологічній основі належать також РА-11, РА-46, РА-56, РА-4, РА-6, РА-410, РА10Т і РА-66. Незважаючи на біологічне походження сировини, більшість біосировинних поліамідів не біодеградабельні за природних умов. Це зумовлено високою стабільністю амідних зв'язків, значною кристалічністю та гідрофобністю полімерних ланцюгів. У довіклі можливе лише повільне фізико-хімічне старіння матеріалу без повної мінералізації. Наразі лише РА-4 та РА, отриманий з ітаконової кислоти, визнані біорозкладними поліамідами. Комерціалізований біополіамід має невелику частку на ринку через малу кількість виробників, а його

Таблиця 1. Властивості поліамідів різних марок

Марка поліаміду	Температура склування, °С	Температура плавлення, °С	Модуль, МПа	Біорозкладання, %
ПА 6	47	218	3000	0
ПА 66	50	258	2500	0
ПА 610	48	206	2100	63
ПА 1010	37	191	1800	100
ПА 11	42	183	1100	100

виробництво становить менше 1 % від загального обсягу виробництва ПА [23].

Завдяки високим ударним властивостям ПА використовують як конструкційний матеріал у машинобудуванні, як антикорозійний матеріал для захисту металів і бетону, в медичній галузі для виготовлення протезів, хірургічних ниток, штучних кровоносних судин. У текстильній промисловості з поліаміду виготовляють нитки, тканини, канати, мотузки, зокрема для альпіністів і рятувальників [21].

Перспективними представниками біорозкладних полімерів є поліамідоестери, оскільки саме в цих полімерах може бути реалізовано необхідне для живлення мікроорганізмів співвідношення вуглецю й азоту. Так, поліамідоестер, отриманий високотемпературною поліконденсацією з олігобутилен-глікольадипінату, 1,6-гексаметилендіаміну і капролактаму, краще сприяє росту грибів порівняно з поліестером (поліетиленглікольадипінатом) і ПА (полікапроамідом) [24].

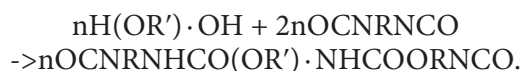
Поліуретани

Близькі за властивостями до поліамідоестерів поліуретани (ПУ) — гетероланцюгові полімери, макромолекула яких містить незаміщену та/або заміщену уретанову групу —N(R)—C(O)O—, де R = H, алкіл-, арил- чи ацилрадикал. Широке коло вихідних сполук, які можуть бути використані для отримання поліуретанів, зумовлює наявність у них ще й інших функціональних груп (сечовинних, алофанатних, біуретових та ін.), а, отже, й різну природу та інтенсивність міжмолекулярної взаємодії, що, безперечно, позначається на їхній структурі та властивостях [25].

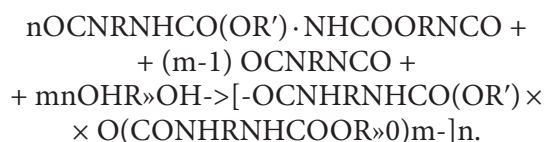
Поліуретани можна синтезувати різними способами, однак широкого практичного застосування набув метод, що базується на взаємодії діізоціанатів з мономерними чи олігомерними сполуками, які містять у молекулі не менше двох гідроксильних груп. Це, зокрема, можуть бути карболанцюгові гліколи чи олігоетери (естери) з кінцевими гідроксильними групами. Утворення лінійних поліуретанів на основі гліколю й діізоціанату відбувається за реакцією поліприєднання за такою загальною схемою:



Зазвичай синтез лінійних блок-кополіуретанів здійснюють у дві стадії. На першій стадії відбувається реакція олігомерного діолу (здебільшого це олігоетеродіол) з діізоціанатом, внаслідок чого утворюється макродіізоціанат (ізоціанатний форполімер, ІФП) за схемою:



На другій стадії на основі діізоціанату та низькомолекулярного гліколю утворюється інший форполімер, який з'єднується за допомогою гліколю з першим форполімером :



Продукти первинного приєднання, які містять уретанові, карбамідні, амідні й інші групи, завдяки наявності атомів водню самі можуть вступати в реакцію з ізоціанатними групами, утворюючи розгалуження чи поперечні хімічні зв'язки. Здатність ізоціанатних груп утворювати з іншими функціональними групами хімічні зв'язки використовують на практиці для отримання тривимірних поліуретанів. Їх отримують також шляхом заміни під час синтезу поліуретанів біфункціональних подовжувачів на три- чи багатофункціональні сполуки або використання триізоціанату чи сполук, які містять понад дві кінцеві ізоціанатні групи. Отже, для отримання поліуретанів з різною хімічною будовою необхідні принаймні три основні компоненти: діізоціанат, олігодіол і подовжувач (зшивач) ланцюга (діол, діамін, вода тощо). Таким чином, використання при синтезі ПУ природних речовин як олігодіолів або подовжувачів ланцюга макромолекул дає змогу поєднувати необхідні механічні властивості полімеру зі здатністю до деградації.

Методом хімічного формування отримано полімерні композити на основі ізоціанатних форполімерів (ІФП) різних типів і похідних целюлози (етилцелюлози, оксипропілцелюлози). Встановлено, що як вихідна целюлоза, так і її похідні вступають у хімічну взаємодію з ІФП з утворенням уретановмісних полімерів просторової будови, властивості яких залежать від співвідношення компонентів [26, 27].

Розроблено принципи створення пінополіуретанів (ППУ) з використанням дисахаридів

(лактози, мальтози, сахарози) й рослинних олій (рицинової, лляної, соєвої, пальмової) чи їхніх похідних як основи при отриманні ІФП [28—30]. Синтезовано ППУ на основі полісахаридів шляхом введення в реакційну суміш водних гелів крохмалю, альгінату натрію, натрій карбоксиметилцелюлози, гідроксиетилцелюлози, а також ППУ, що містить одночасно полісахарид і рослинну олію чи її похідну. Встановлено, що вирішальним фактором у формуванні структури та властивостей отриманих матеріалів, зокрема здатності до деградації за умов довкілля, є хімічне зв'язування природних сполук з синтетичною складовою. Шляхом введення природних сполук різної будови до складу традиційного ППУ вдалося не тільки підвищити біодеградабельність, а й певною мірою поліпшити фізико-механічні властивості ППУ.

Розроблено способи синтезу здатних до деградації за умов довкілля полімерних систем на основі іономерного поліуретану (ІПУ) з підвищеним вмістом ксантану та рицинової олії в макроланцюзі. Показано, що варіювання вмісту рослинного компонента (рицинової олії) дає змогу регулювати властивості нових ІПУ та процес їх деградації за умов навколишнього середовища [31].

Досліджено сегментовані поліуретани, синтезовані з ізоціанатного форполімеру (ІФП), отриманого з олігооксипропіленгліколю (ООП, ММ 1052) і 2,4-толуїлендіізоціанату (2,4-ТДІ) за співвідношення 1:2 і поліолу на основі ріпакової олії як подовжувача полімерного ланцюга з додаванням 2,4-ТДІ [32].

В огляді [33] проаналізовано понад 20 різних поліолів, отриманих із відновлюваної сировини, і показано перспективність їх для синтезу пінополіуретанів із необхідними експлуатаційними та біодеградабельними властивостями.

Вироби та конструкції на основі поліуретанів використовують практично в усіх галузях промисловості, в техніці та побуті. На основі поліуретанів можна виробляти всі технічно цінні полімерні матеріали. Серед поліуретанів є термопласти, еластомери, а також гібриди — термоеластоласти. Їх переробляють усіма відомими методами: пресуванням, екструзією, литтям, заливанням, реакційно-інжекційним формуванням тощо. Можна отримувати вироби в єдиному циклі — синтез полімеру й

формування виробів, що зумовлює значну технологічну та економічну доцільність виробництва матеріалів цього виду. Це жорсткі й еластичні пінопласти та синтетичні волокна, каучуки й гуми, герметики й заливні компаунди, клеї, лаки та емалі, плівкові матеріали, різні функціональні композити тощо [34]. Тому надання ПУ біодеградабельних властивостей — актуальне завдання.

Широке використання поліуретанів потребує знання здатності їх до біологічного розкладання. Досліджено активність бактерій, які існують у ґрунті (роду *Pseudomonas* та *Bacillus subtilis*), та дріжджів *Yarrowia lipolytica* (синонім: *Candida lipolytica*), спроможних виділяти велику кількість ферментів (ліпаз, протеаз, естераз), щодо деградації комерційних ПУ марок Tecoflex® і Tecothane® компанії Lubrizol (США) [35]. Зразки ПУ інкубували з чистими культурами мікроорганізмів за температури 30 °С протягом п'яти місяців. Встановлено, що Tecoflex® менш стабільний, ніж Tecothane®. Це можна пояснити наявністю ароматичних кілець у групі дифенілметандіізоціанату в хімічній будові Tecothane®. Бактеріальні штами *Bacillus subtilis* і *Pseudomonas fluorescens*

Таблиця 2. Мікроорганізми, здатні розкладати поліестер- і поліетервмісні ППУ [35]

Тип ППУ	Штам мікроорганізмів	Місце існування
Поліестер	<i>Cladosporium</i> sp. <i>Aspergillus</i> sp.	ґрунт ґрунт та органічні відходи
	»	ґрунт
	» <i>Penicilliumchrysogenum</i>	ґрунт
	» <i>Chryseobacterium meningosepticum</i>	Комерційний біологічний агент
	» <i>Pseudomonas</i> sp.	ґрунт
Поліетер	» <i>Fusariumsolani</i>	Вода
	» <i>Alternaria</i> sp.	ґрунт
	» <i>Cladosporium</i> sp.	»
	» <i>Aspergillus</i> sp.	»
	» <i>Penicilliumchrysogenum</i>	»
	» <i>Anaerolineaceae</i> sp.	Реактор з біоплівкою
	» <i>Clostridium</i> sp.	»
	» <i>Sphaerotill</i> sp.	»
	» <i>Caldilinea</i> sp.	»
	» <i>Arenimonas</i> sp.	»
	» <i>Comamonasacidovorans</i>	ґрунт і вода
» <i>Bacillus</i> sp.	ґрунт і осад зі стічних вод	
» <i>Thermus</i> sp.	Осад зі стічних вод	

показали набагато помітнішу деструктивну дію порівняно зі штамом дріжджів *Y. Lipolytica*.

Дуже докладно процеси біодеградації пінополіуретанів у довкіллі, зокрема й отриманих із використанням відновлюваних джерел сировини, подано в огляді [36].

При деструкції ППУ під дією абіотичних факторів відбуваються процеси, описані в другій частині цього огляду, зокрема фото- й термоокиснення та гідроліз. Швидкість розкладання залежить від хімічної природи і просторової структури ППУ.

Стосовно біологічної деградації слід зазначити, що існують групи мікроорганізмів, здатних розкладати ППУ певних типів (табл. 2).

Отже нині спостерігається тенденція розроблення нових типів поліуретанів з використанням відновлюваних ресурсів або таких, що зберігають необхідні експлуатаційні параметри протягом терміну їх використання в поєднанні з прискороною деградацією під дією різних природних факторів.

Поліпропіленкарбонат

Поліпропіленкарбонат (ППК) — біодеградабельний аліфатичний полімер, мономерна ланка якого наведена на рис. 4.

Отримують ППК шляхом синтезу епоксипропану ($\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2$) з діоксидом вуглецю (CO_2) за наявності каталізаторів на основі цинку, рідкісноземельних координаційних каталізаторів, металевого порфіринового комплексу або біметалічних ціанідних каталізаторів [37].

Поліпропіленкарбонат — аморфний полімер зі слабкою міжмолекулярною взаємодією і, відповідно, низькими механічними властивостями. Наявність етерних зв'язків ($-\text{O}-$) у головному ланцюзі ППК підвищує гнучкість макромолекули і поліпшує розчинність полімеру в органічних розчинниках. Полярна карбонільна група ($-\text{CO}-$) збільшує міжмолекулярні сили і жорсткість макромолекули. Естерна група ($-\text{COO}-$) легко гідролізується і розщеплюється, тому ППК чутливий до гідролізу. Кінцева група ППК — гідроксильна група — OH , тому КПП нестійкий до нагрівання, температура термічного розкладання становить 218°C . Температура склування КПП змінюється в діапазоні $30\text{—}41^\circ\text{C}$, модуль еластичності становить 993 МПа , міцність при розтягуванні

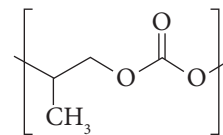


Рис. 4. Мономерна ланка поліпропіленкарбонату

$33,2\text{ МПа}$, діелектрична проникність $3,0$, гігроскопічність за температури 23°C становить $0,397$. ППК має чудові бар'єрні властивості щодо кисню, тому цей полімер часто використовують як пакувальний матеріал для зберігання продуктів за низької температури.

Для поліпшення механічних і термічних властивостей ППК модифікують шляхом змішування в розплаві або в розчині з неорганічними речовинами (гідроксидом алюмінію, монтморилонітом, карбонатом кальцію та ін.), натуральними органічними полімерами (целюлозою, лігніном, крохмалем тощо), іншими біодеградабельними полімерами (ПМК, ПКЛ і т. п.). Змішування в розплаві має переваги перед змішуванням у розчині, тому що його легше промислово реалізувати і він не потребує операцій видалення й відновлення розчинника [38].

Поліпропіленкарбонат має широкий спектр застосування: як пакувальний матеріал, особливо для медичних товарів і продуктів харчування, коли необхідно тривалий час зберігати антибактеріальні властивості; в текстильній промисловості для виробництва нетканих матеріалів (наприклад флізеліну) та медичних перев'язувальних матеріалів; у будівництві (ламіновані пластини для підлоги, деревно-пластикові композити); в матеріалах для акумуляторів; для виготовлення мембран і т. ін. [38, 39].

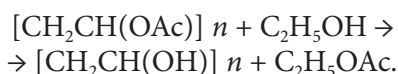
Поліпропіленкарбонат — біодеградабельний полімер, розкладається переважно за рахунок гідролізу, який може бути прискорений залишками каталізатора — кислоти Льюїса.

Полівініловий спирт

Полівініловий спирт (ПВС) — водорозчинний синтетичний полімер, який може бути у двох формах (рис. 5): повністю гідролізований (А) і частково гідролізований (В) [40, 41].

На відміну від більшості вінілових полімерів, ПВС отримують не полімеризацією відповідного мономеру, оскільки мономер вінілового спирту термодинамічно нестабільний щодо

його таутомеру — ацетальдегіду. Натомість ПВС отримують гідролізом полівінілацетату чи інших полімерів на основі вінілового естеру з форміатними чи хлорацетатними групами замість ацетатної. Полівінілові естери зазвичай переестерифікують із етанолом за наявності лужних каталізаторів:



Ступінь переестерифікації впливає на властивості полімеру. Варіюванням початкової довжини ланцюга полівінілацетату, а також умов гідролізу можна отримувати продукти ПВС молекулярної маси від 20 000 до 400 000 з різними властивостями відповідно. Повідомляється, що коли полівінілацетат гідролізується менше 70 %, отримання ПВС не піддається біологічному розкладанню; натомість повністю гідролізований полімер за таких самих умов розкладається повністю [42].

Полівініловий спирт — атактичний кристалічний полімер. Через високий ступінь кристалічності його не можна переробляти як термопласт. ПВС термічно розкладається за температури близько 150 °С, що значно нижче температури плавлення (200 °С). Отже плівки ПВС можна формувати дорогим способом лиття розчину. Але компанія Environmental Polymers Group (EPG) (Велика Британія) запатентувала процес екструзії разом з технологією виготовлення ПВС для випуску термопластичних гранул, які можна перетворювати на плівку та листові вироби. EPG-ПВС, який здебільшого має кристалічність 40—50 %, може бути використаний для виробництва плівок із міцністю на розтягнення й розрив, що перевищує відповідні характеристики ПЕ і ПВК (табл. 3).

Полівініловий спирт має чудові плівкотвірні, емульгувальні та адгезійні властивості. Він стійкий до дії мастил, жирів і розчинників (не розчиняється в аліфатичних і ароматичних вуглеводнях, естерах і кетонах).

Полівініловий спирт використовують у виробництві пакувальних плівок, паперу, для проклеювання текстильної основи, як загусник і стабілізатор емульсій у складі клею ПВА та в різних покриттях, як полімерний носій для пестицидів і гербіцидів, для виготовлення фотоплівки й вінілового волокна. Завдяки біосумісності, малій схильності до адгезії білків і

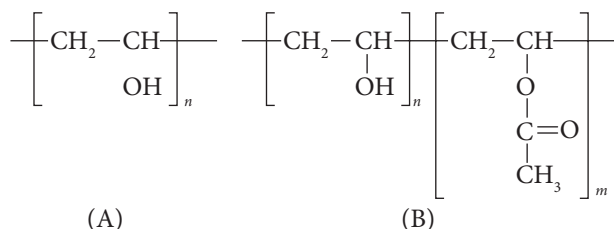


Рис. 5. Мономерні ланки ПВА повністю гідролізованого (А) та частково гідролізованого (В)

Таблиця 3. Порівняння властивостей плівок EPG-ПВС і плівок поліетилену (ПЕ) та полівінілкапролактону (ПВК) [40]

Показники	EPG-ПВС	ПЕ	ПВК
Прозорість (пропускання світла), %	60—66	54—58	48—58
Водопоглинання (40 °С, вологість 90 %)	1,5—2,0	35—180	120—180
Міцність на розрив за методом Ельмендорфа, мН	147—834	29—98	39—76
Міцність на розрив, МПа	44—64	17—19	20—76
Подовження при розриві, %	150—400	50—600	5—250

низькій токсичності його застосовують у медицині та фармакології, наприклад для виготовлення хрящових замінників, контактних лінз і очних крапель. Пероральні лікарські форми, надруковані на 3D-принтері, демонструють великий потенціал у фармацевтичній промисловості. Частково гідролізований ПВС використовують у харчовій промисловості [43, 44].

Порівняно з іншими вініловими полімерами ПВС має найкращі біодеградабельні властивості. Біодеструкція ПВС відбувається внаслідок випадкового розщеплення ланцюга. За участі ферментів ПВС-оксидази і ПВС-дегідрогенази гідроксильна група окиснюється з утворенням дикетон-них і монокетон-них структур і відбувається гідроліз карбонільних структур за участі ПВС-гідролази. Ефективні в руйнуванні ПВС штами бактерій *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Acinetiobacter* і *Flammulinavelutipes* [40].

Отже хоча природні полімери мають безсумнівні переваги перед синтетичними з погляду походження мономерів і екологічної лояльності, біорозкладні полімери, які отримують із синтетичних мономерів, формуються за стабільних і контрольованих умов, тому й партії полімерів однорідні за показниками. Ці БРП мають кращі технологічні, фізико-механічні

показники та експлуатаційні властивості порівняно з природними, що робить їх перспективними в різних сферах практичного використання.

Внесок авторів

Ця стаття була написана за участю всіх авторів. Усі автори затвердили остаточну версію рукопису.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Доступність даних

Дані, що підтверджують висновки цього дослідження, можна отримати у відповідального автора за обґрунтованим запитом.

REFERENCES

1. *Chinthapalli R., Skoczinski P., Carus M., et al.* Biobased building blocks and polymers—global capacities, production and trends, 2018—2023, *Industrial Biotechnology*, 2019, **15**, 4: 237—241. <https://doi.org/10.1089/ind.2019.29179.rch>.
2. *Rosenboom J.G., Langer R., Traverso G.* Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 2022, **7**, 2: 117—137. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>.
3. *Cakmak O.K.* Biodegradable polymers — A review on properties, processing, and degradation mechanism. *Circular Economy and Sustainability*, 2024, **4**, 1: 339—362. <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00277-y>.
4. *Labet M., Thielemans W.* Synthesis of polycaprolactone: a review. *Chemical Society Reviews*, 2009, **38**, 12: 3484—3504. <https://doi.org/10.1039/b820162p>.
5. *Ntrivala M. A., Pitsavas A. C., Lazaridou K., Baziakou Z., Karavasili D., Papadimitriou M., Ntagkopolou C., Balla E., Bikiaris D. N.* Polycaprolactone (PCL): The biodegradable polyester shaping the future of materials — a review on synthesis, properties, biodegradation, applications and future perspectives. *European Polymer Journal*, 2025, **234**, 114033. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2025.114033>.
6. *Ikada Y., Tsuji H.* Biodegradable polyesters for medical and ecological applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 2000, **21**, 3: 117—132. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3927\(20000201\)21:3%3C117::AID-MARC117%3E3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3927(20000201)21:3%3C117::AID-MARC117%3E3.0.CO;2-X).
7. *Ilyas R.A., Zuhri M.Y.M., Norrahim M.N.F., et al.* Natural fiber-reinforced polycaprolactone green and hybrid biocomposites for various advanced applications. *Polymers*, 2022, **4**, 1: 182. <https://doi.org/10.3390/polym14010182>.
8. *Dwivedi R., Kumar S., Pandey R., et al.* Polycaprolactone as biomaterial for bone scaffolds: Review of literature. *Journal of oral biology and craniofacial research*, 2020, **10**, 1: 381—388. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2019.10.003>.
9. *Bartnikowski M., Dargaville T.R., Ivanovski S., Hutmacher D.W.* Degradation mechanisms of polycaprolactone in the context of chemistry, geometry and environment. *Progress in Polymer Science*, 2019, **96**: 1—20. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.05.004>.
10. *Rafiqah S., Khalina A., Harmaen A.S., et al.* A review on properties and application of bio-based poly (butylenesuccinate). *Polymers*, 2021, **13**, 9: 1436—1464. <https://doi.org/10.3390/polym13091436>.
11. *Barletta M., Aversa C., Ayyoob M., et al.* Poly (butylenesuccinate) (PBS): Materials, processing, and industrial applications. *Progress in Polymer Science*, 2022, **132**: 101579. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101579>.
12. *Quecholac-Piña X., Hernández-Berriel M.D.C., Mañón-Salas M.D.C., et al.* Degradation of plastics under anaerobic conditions: A short review. *Polymers*, 2020, **12**, 1: 109—127. <https://doi.org/10.3390/polym12010109>.
13. *Jian J., Xiangbin Z., Xianbo H.* An overview on synthesis, properties and applications of poly (butylene-adipate-co-terephthalate)—PBAT. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020, **3**, 1: 19—26. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.001>.
14. European Bioplastics. Available online: https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2025/EUBP_Market_Data_Report_2025.pdf.
15. *Roy S., Ghosh T., Zhang W., Rhim J.* Recent progress in PBAT-based films and food packaging applications: A mini-review. *Food Chemistry*, 2024, **437**, 137822. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137822>.
16. *Burford T., Rieg W., Madbouly S.* Biodegradable poly (butyleneadipate-co-terephthalate) (PBAT). *Physical Sciences Reviews*, 2023, **8**, 8: 1127—1156. <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0078>.
17. *Meyer-Cifuentes I.E., Werner J., Jehmlich N., et al.* Synergistic biodegradation of aromatic-aliphatic copolyester plastic by a marine microbial consortium. *Nature communications*, 2020, **11**, 1: 1—13. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19583-2>.
18. *Ferreira F.V., Cividanes L.S., Gouveia R.F., Lona L.M.* An overview on properties and applications of poly (butyleneadipate-co-terephthalate)—PBAT based composites. *Polymer Engineering & Science*, 2019, **59**, 2: 7—15.
19. *Itabana B. E., Mohanty A. K., Dick P., Sain M., Bali A., Tiessen M., Lim L. T., Misra M.* Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) — Based Biocomposites: A Comprehensive Review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2024, **309**(12), 2400179. <https://doi.org/10.1002/mame.202400179>.

20. Winnacker M., Rieger B. Biobased polyamides: recent advances in basic and applied research. *Macromolecular rapid communications*, 2016, **37**, 17: 1391—1413. <https://doi.org/10.1002/marc.201600181>.
21. Khedr M.S.F. Bio-based polyamide. *Physical Sciences Reviews*, 2023, **8**, 7: 827—847. <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0076>.
22. Diaz-Galbarriatu M., Sánchez-Bodón J., Hernández-Laviña E., Vilas-Vilela J. L., Moreno-Benítez I. Biobased Polyamides: A Journey from the Biomass Towards Cutting Edge Materials. *Polymers*, 2025, **17**(19), 2599. <https://doi.org/10.3390/polym17192599>.
23. Zheng L., Wang M., Li, Y., Xiong Y., Wu C. Recycling and Degradation of Polyamides. *Molecules*, 2024, **29**(8), 1742. <https://doi.org/10.3390/molecules29081742>.
24. Radzik P., Leszczyńska A., Pieliowski K. Modern biopolyamide-based materials: synthesis and modification. *Polymer Bulletin*, 2020, **77**, 1: 501—528. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02718-x>.
25. Lipatov Yu.S., Kercha Yu.Yu., Sergeeva L.M. Structure and properties of polyurethanes. Kiev: Nauk. dumka, 1970: 280.
26. Ryabov S.V., Kobrina L.V., Kercha Yu.Yu., Kosenko L.A., Shtompel V.I., Laptii S.V., Kuporev B.A. Structural-chemical modification of urethane-containing polymers with ethyloxyethyl cellulose. *Polymer Science Series A*, 2002, **44**(9): 941—946.
27. Ryabov S.V., Kobrina L.V., Shtompel V.I., Vilenskij V.A., Kercha Y.Y., Laptij S.V. Urethane-containing composites based on ethyloxyethylcellulose. *Ukrainskij Khimicheskij Zhurnal*, 2003, **69**(5—6): 120—12.
28. Savelyev Yu. V., Yanovych I. V., Markovska L. A., Akhranovych O. R., Savelyeva O. A., Robota L. P. Creation of new polyurethane lactose-containing foams capable to degradation in environment. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2011, 7: 138—142.
29. Savelyev Yu. V., Yanovych I. V., Akhranovych O. R., Markovska L. A., Budash Yu. A., Savelyeva O. A. Polyurethane foams based on natural polysaccharides. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2012, 9: 124—130.
30. Savelyev Y., Markovskaya L., Savelyeva O., Akhranovich E., Parkhomenko N., Travinskaya T. Degradable polyurethane foams based on disaccharides. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, **132**(25). <https://doi.org/10.1002/app.42131>.
31. Travinskaya T.V., Brykova A.N., Savelyev Yu.V. Degradable ionic polyurethanes based on vegetable oil and polysaccharide: preparation and properties. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2016, 12, 82—89.
32. Vilensky V.A., Kobrina L.V., Riabov S.V., Kercha Y.Y., Boyko V.V., Brovko A.A., Tkalič M.G., Lebedev A.F. Polyurethanes based on hydroxylated rapeseed oil: thermal and dynamic mechanical properties *Polimernyi Zhurnal*, 2015, **37**, 2, 162—167 <https://doi.org/10.15407/polymerj.37.02.162>.
33. Furtwengler P., Avérous L. Renewable polyols for advanced polyurethane foams from diverse biomass resources. *Polymer Chemistry*, 2018, **9**, 32: 4258—4287. <https://doi.org/10.1039/C8PY00827B>.
34. Das A., Mahanwar P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020, **3**, 3: 93—101. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.07.002>.
35. Stepien A.E., Zebrowski J., Piszczczyk Ł., et al. Assessment of the impact of bacteria *Pseudomonas denitrificans*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* and yeast *Yarrowia lipolytica* on commercial poly (etherurethanes). *Polymer Testing*, 2017, **63**: 484—493. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.038>.
36. Skleničková K., Abbrent S., Halecký M., et al. Biodegradability and ecotoxicity of polyurethane foams: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, **52**, 2: 157—202. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1818496>.
37. Li X., Meng L., Zhang Y., et al. Research and Application of Polypropylene Carbonate Composite Materials: A Review. *Polymers*, 2022, **14**, 11: 2159—2182. <https://doi.org/10.3390/polym14112159>.
38. Bora D., Dutta H., Saha B., et al. A review on modification of polypropylenecarbonate (PPC) using different types of blends/composites and its advanced uses. *Materials Today Communications*, 2023, **37**: 107304. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107304>.
39. Wang L., Li Y., Yang J., et al. Poly (Propylene Carbonate)-Based Biodegradable and Environment-Friendly Materials for Biomedical Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, **25**, 5: 2938. <https://doi.org/10.3390/ijms25052938>.
40. Halima N.B. Poly (vinylalcohol): review of its promising applications and in sights into biodegradation. *RSC Advances*, 2016, **6**, 46: 39823—39832. <https://doi.org/10.1039/C6RA05742J>.
41. Saini T., Meena J., Verma V., Saini S., Malik R. Polyvinyl alcohol: Recent advances and applications in sustainable materials. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2025, **64**(6), 794—825. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2438046>.
42. Bastioli C. (Ed.). *Handbook of biodegradable polymers*. Walter de Gruyter GmbH&Co KG., 2020: 520. <https://doi.org/10.1515/9781501511967>.
43. Verma C., Quraishi M.A. Polyvinylalcohol (PVA) as a biodegradable polymeric anticorrosive material: A review on present advancements and future directions. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2022, **57**, 8: 796—812. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2022.2125621>.

44. Fan Y., Ren J., Cao Y., Zou Y., Xiao X., Liu, F. Recent Advances in Polyvinyl Alcohol—Based Biodegradable Packaging: Preparation, Modification, and Applications in Food Packaging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2025, **24**(6), e70334. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70334>.

Received 15.12.2025

Accepted 19.01.2026

Published 31.03.2026

Valentyna Boiko

ORCID: 0000-0002-5527-0468

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48 Kharkivske shose, Kyiv 02155, Ukraine

e-mail: valboyko54@gmail.com

Sergii Riabov

ORCID: 0000-0003-2996-3794

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48 Kharkivske shose, Kyiv 02155, Ukraine

e-mail: sergii.riabov@gmail.com

Larisa Kobrina

ORCID: 0000-0001-6801-0801

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48 Kharkivske shose, Kyiv 02155, Ukraine

e-mail: kobrina.larisa@gmail.com

Anton Tymoshyk

ORCID: 0009-0003-3730-1771

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48 Kharkivske shose, Kyiv 02155, Ukraine

e-mail: antontimoshik9@gmail.com

Tetiana Dmytrieva

ORCID: 0000-0002-3526-8395

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48 Kharkivske shose, Kyiv 02155, Ukraine

BIODEGRADABLE POLYMERS. Part 3. POLYMERS OBTAINED FROM SYNTHETIC MONOMERS

The review focuses on biodegradable polymers (BDPs) produced by traditional synthesis from synthetic monomers. Attention is paid to aliphatic polyesters (polycaprolactone, polybutylene succinate), aliphatic-aromatic copolyesters (poly(butylene adipate-co-terephthalate), aliphatic polyamides, polyamide ethers, polyurethanes, polypropylene carbonate, and polyvinyl alcohol). These polymers, due to their structural features, can undergo biological degradation under the influence of natural factors in both aerobic and anaerobic conditions. The synthesis methods for each of these BDPs are analyzed in detail, and schemes for their preparation are provided, along with examples of raw materials, polymerization catalysts, and other technological nuances. The physical, thermal, and mechanical properties are provided for each of the specified BDPs, depending on their molecular weight and degree of crystallinity. The types of solvents for these polymers are listed. It is shown that to improve the operational characteristics of BDPs, copolymers and mixtures with other high-molecular compounds are obtained. References are provided for areas of application of BDPs obtained from synthetic monomers. The mechanism of degradation of these polymeric materials in the natural environment is described, and strains of microorganisms that decompose these BDPs in the environment are listed.

The review analyzed publications during the past few decades, which allows us to conclude about the relevance of scientific and technical research and practical use of biodegradable polymers elaborated from synthetic monomers.

Keywords: *biodegradable polymers, synthetic monomers, polycaprolactone, polybutylene succinate, aliphatic polyesters, aliphatic polyamides, polyamide esters, polyurethanes, polypropylene carbonate, polyvinyl alcohol.*