

## СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ СИРОВИНИ БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

*Проаналізовано сучасний стан і перспективи виробництва та використання біопластика на основі відновлювальної сировини біологічного походження. Вказується, що накопичення пластмас у навколишньому середовищі є загальносвітовою проблемою і якщо не буде вжито заходів, то до 2050 року на нашій планеті буде накопичено до 12 млрд. т пластикових відходів. Головною проблемою є те, що пластмаси, вироблені з нафти та газу, не піддаються біологічному розкладанню, тому викликають серйозні екологічні проблеми. Крім того, зменшення запасів і зростання вартості викопного палива спонукають до пошуку альтернативних, екологічно чистих і сталих джерел сировини для виробництва пластмас, зокрема – на біологічній основі. Одна з головних причин меншого поширення таких пластмас є те, що вони суттєво дорожчі, ніж пластмаси на основі викопної сировини. До їх переваг належить зменшення викидів CO<sub>2</sub>, зменшення залежності від викопних ресурсів і можливість повного перероблення після закінчення терміну використання. Джерелами пластмас на біологічній основі можуть бути цукроносні, крохмаленосні культури та лігніноцелюлозні матеріали. Лігноцелюлозна біомаса є найбільш поширеною відновлювальною біомасою на Землі, тому у майбутньому її застосування для виробництва біополімерів буде мати вирішальне значення.*

*Тополя, а також міскантус та світчграс можуть бути перспективними у якості джерела високоякісної целюлози для виробництва біопластика, оскільки вони характеризуються високою якістю сировини та високою врожайністю біомаси.*

**Ключові слова:** біопластик, целюлоза, геміцелюлоза, лігнін, тополя, міскантус.

Щороку в світі виробляється близько 300 млн. т. полімерних матеріалів або пластмас, при цьому утворюється більше 6 млн. т пластикових відходів, з яких лише 9 % переробляється, 12 % – спалюється, а решта 79 % – викидається на сміттєзвалища [1]. Накопичення пластмас у навколишньому середовищі є загальносвітовою проблемою. Якщо не буде вжито заходів, то до 2050 року на нашій планеті буде накопичено до 12 млрд. т пластикових відходів. Головною проблемою є те, що пластмаси, вироблені з нафти та газу, не піддаються біологічному розкладанню, тому викликають серйозні екологічні проблеми [2, 3,

---

<sup>1</sup>Роїк Микола Володимирович, доктор с.-г. наук, професор, академік НААН, директор. E-mail: roiknok@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7221-6247>;

<sup>1</sup>Ганженко Олександр Миколайович, доктор с.-г. наук, с.н.с., зав. відділом. E-mail: [ganzhenko74@gmail.com](mailto:ganzhenko74@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8118-1645>;

<sup>2</sup>Фучило Ярослав Дмитрович, доктор с.-г. наук, професор, завідувач кафедри лісівництва та захисту лісу. E-mail: [fuchylo\\_yar@ukr.net](mailto:fuchylo_yar@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0002-2669-5176>.

4]. Крім того, зменшення запасів і зростання вартості викопного палива спонукають до пошуку альтернативних, екологічно чистих і сталих джерел сировини для виробництва пластмас.

Останні роки проводиться багато досліджень з розробки біопластику. Однак, слід зазначити, що термін «біопластик» не однозначний – він застосовується як до пластику біологічного походження, так і до пластику, що біологічно розкладається [5, 6, 7] (табл. 1).

Таблиця 1

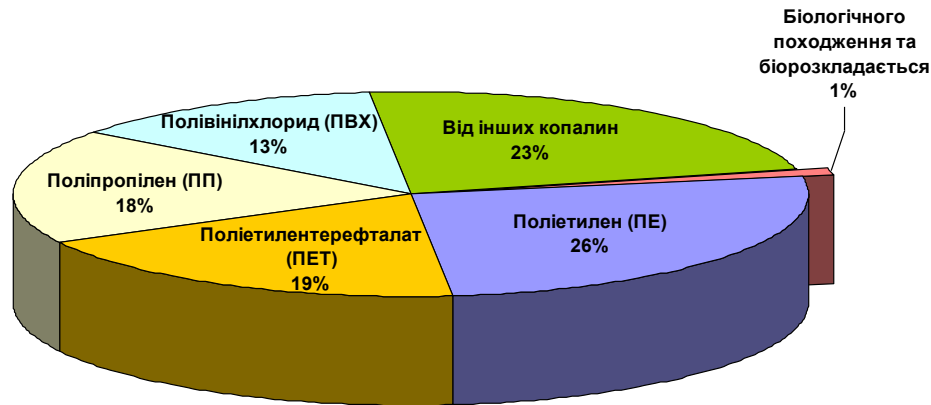
### Класифікація пластику за походженням та здатністю до біорозкладання

Здатність до біорозкладання	Сировина для виробництва поліластику		
	Нафтохімічна	Частково на біологічній основі	На біологічній основі
Не розкладається	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Поліетилен (ПЕ)</li> <li>• Поліпропілен (ПП)</li> <li>• Поліетилентерефталат (ПЕТ)</li> <li>• Полістирол (ПС)</li> <li>• Полівінілхлорид (ПВХ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Біо-ПЕТ</li> <li>• Політриметилентерефталат (РТТ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Біо-ПЕ</li> </ul>
Розкладається	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Полібутират адипаттерефталат (ПБАТ)</li> <li>• Полібутиленсукцинат (ПБС)</li> <li>• Полікапролактон (ПКЛ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Суміш крохмалю з біорозкладними поліефірами</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Полімолочна кислота (ПМК)</li> <li>• Полігідроксиалканоати (ПГА)</li> </ul>

Таким чином, лише полімолочну кислоту (ПМК), що отримується з крохмалю, білку, кукурудзи, та полігідроксиалканоати (ПГА), які отримують з мікроорганізмів можна вважати біополімерами здатними до біологічного розкладання [8, 9]. Водночас, частка пластику на біологічній основі та біорозкладного пластику складає лише до 1% від загального світового виробництва пластмас. (рис. 1).

Одна з головних причин меншого поширення пластмас на біологічній основі та біологічно розкладних є те, що вони суттєво дорожчі, ніж пластмаси на основі викопної сировини (табл. 2). Крім того, більшість пластмас на біологічній основі мають вищу щільність, що призводить до ще більшого підвищення їх ціни [11]. Однак, покращення технологій, зростання попиту сприятиме зменшенню вартості біологічних пластмас.

Ще однією проблемою широкого застосування біологічних пластмас є те, що вони поки що не повністю відповідають вимогам за своїми механічними або фізичними показниками [12, 13].



**Рис. 1. Структура світового виробництва пластиків**

Так, наприклад полімолочна кислота (ПМК) – це 100% пластик на біологічній основі, який придатний до компостування, широко використовується у виробництві упаковок. Перевагами ПМК є її прозорість, блиск, жорсткість, придатність до друку, технологічність. Водночас без додаткових матеріалів ПМК не придатний для упаковки чутливих до вологи продуктів, наприклад: печива, чіпсів, снєків тощо [11].

*Таблиця 2*

**Порівняння вартості поліетилену та біопластику**

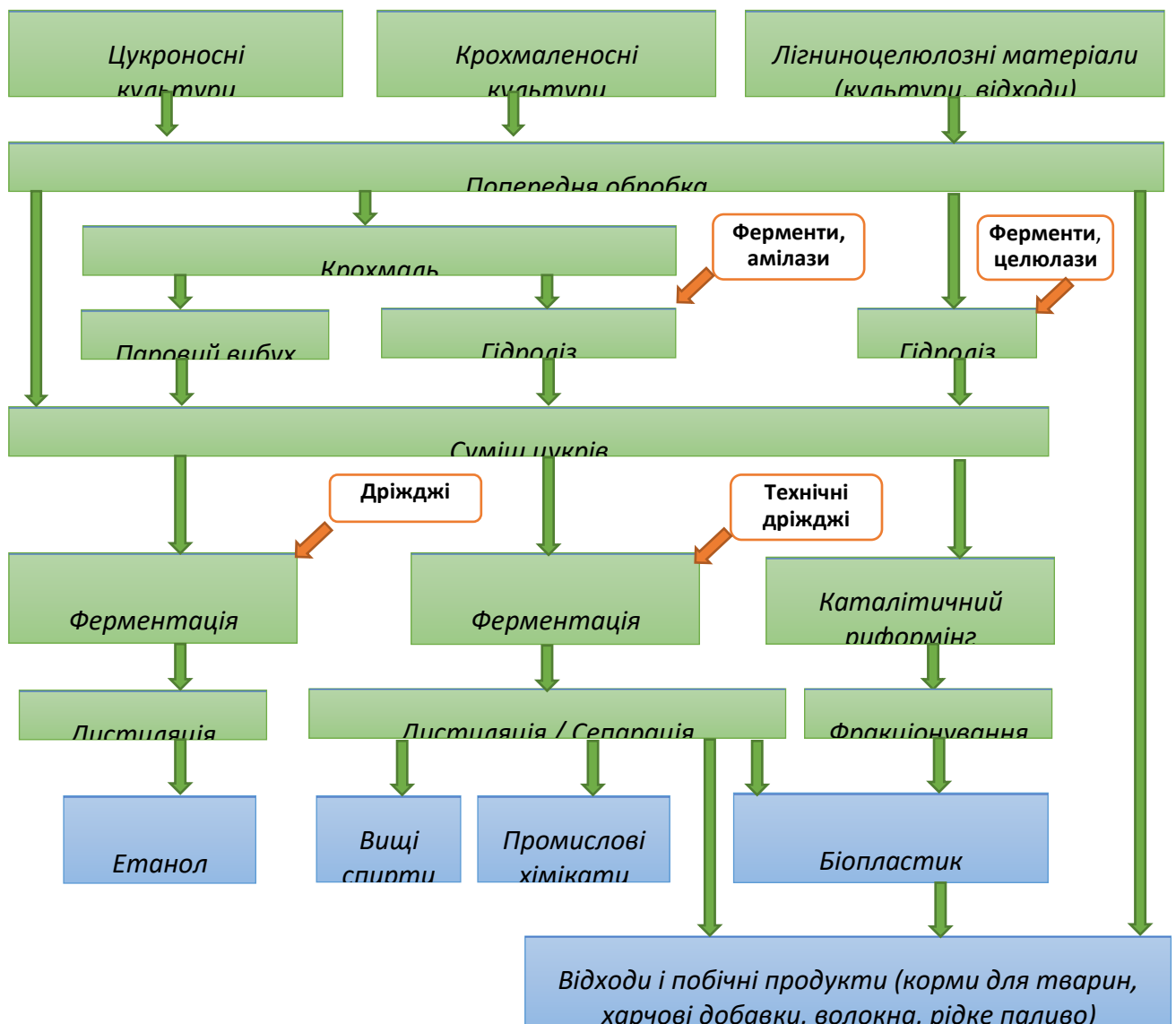
Види пластику	Ціна, євро/т	Щільність, кг/м <sup>3</sup>
Поліетилен	1250-1450	910-940
Біополіетилен	+ 20-40%	910-970
Полібутират адипаттерефталат	+ 35 разів	1250
Полігідроксикапролати	+ 5 разів	1200-1250
Полімолочна кислота	+ 2 разів	1250
Крохмальні суміші	+ 2-4 разів	1250-1350

Незважаючи на це пластмаси на біологічній основі мають суттєві переваги у сфері сталого розвитку порівняно з пластиком на основі викопного палива. До таких переваг належить зменшення викидів CO<sub>2</sub>, зменшення залежності від викопних ресурсів і можливість повного перероблення після закінчення терміну використання.

Сьогодні біопластики, в основному виробляються з відновлюваної, багатой вуглеводами сировини. Так, наприклад, найбільш поширений біопластик полімолочна кислота виробляється з цукру-сирцю з цукрової тростини чи цукрових буряків, або декстрази з кукурудзяного крохмалю або крохмалю маніюки.

У цілому, джерелами пластмас на біологічній основі можуть бути цукроносні, крохмаленосні культури та лігніноцелюлозні матеріали [14]. Серед цукроносних культур найбільш поширені цукрова тростина і цукрові буряки, а також цукрове сорго. Цукор виділяється шляхом подрібнення (цукрова тростина,

цукрове сорго) або шляхом теплової екстракції і випаровування (цукровий буряк) (рис. 2).



**Рис. 2. Біохімічні ланцюжки створення доданої вартості**

Крохмаленосні культури – це в основному кукурудза, пшениця, інші зернові та картопля. Крохмаль – це полісахарид для ферментації якого необхідно гідролізувати його до моносахаридів (цукрів). Для оцукрювання крохмалю зазвичай застосовується метод ферментативного гідролізу амілазами. Під час ферментативного гідролізу крохмальні культури подрібнюються і розтираються; потім додають ферменти (амілази), які перетворюють крохмаль в цукор [15].

Масове використання сировини на основі цукру (цукрова тростина, цукровий буряк) і крохмалю (кукурудза, пшениця, тритикале, картопля, рис і т.д.) для виробництва біопластика та біопаливо може суттєво вплинути на ціни продуктів харчування і землекористування. Виробництво біопластику з лігноцелюлозної біомаси може бути хорошою альтернативою, головним чином через її доступність в усьому світі і неконкурентність із продуктами харчування [16].

Лігноцелюлоза – структурний матеріал біомаси рослин. Термін «лігноцелюлоза» включає в себе відходи сільського господарства і деревопереробної промисловості, деревину з лісового господарства, короткоротаційні деревні плантації та лігноцелюлозні енергетичні культури, зокрема – багаторічні трави (світчграс, міскантус та інші).

Лігноцелюлозна біомаса є найбільш поширеною відновлювальною біомасою на Землі, тому у майбутньому її застосування для виробництва біополімерів буде мати вирішальне значення. Крім того, вона значно дешевше сировини, і її можна виробити швидко і з меншими витратами, ніж інші важливі для сільськогосподарські види сировини. Таким чином, лігноцелюлозна біомаса вважається ідеальною поновлювальною сировиною для виробництва біопластика, біопалива та інших речовин.

На сьогодні з лігноцелюлози отримано понад 200 сполук з доданою вартістю [17]. Водночас підвищення цінності лігноцелюлозної біомаси все ще залишається великою проблемою. Сьогодні в усьому світі проводиться значна кількість досліджень з підвищення ефективності і зменшення витрат під час перетворення лігноцелюлозної біомаси на хімічні сполуки і полімери [18]. Одна з найбільш важливих цілей – розділити лігноцелюлозу на три основних компоненти: целюлозу, геміцелюлозу і лігнін.

Як правило, спочатку перед оцукрюванням лігноцелюлозну сировину піддають попередній обробці для розділення на складові. Найпоширеніший спосіб – це «паровий вибух» якій проводять разом або без кислотного каталізатору. Після відділення целюлози і геміцелюлози від лігніну проводиться оцукрювання полісахаридів, як правило, шляхом ферментативного гідролізу (з використанням целюлаз і геміцелюлаз). Цукри C6 можна зброджувати звичайними дріжджами, в той час як цукри C5 для ферментації потребують певних видів мікроорганізмів. У даний час лігнін зазвичай відокремлюють і сушать, щоб використовувати в якості палива, оскільки він багатий вуглецем і воднем, тому володіє високою теплотворною здатністю (до 25 МДж/кг)

Основним компонентом лігноцелюлози є целюлоза. На відміну від глюкози та інших глюканових полімерів, одиницею целюлозного ланцюга є дисахарид целобіоза. Його структура складається з великих внутрішньо молекулярних і міжмолекулярних мереж водневих зв'язків, які міцно пов'язують одиниці глюкози. Оскільки близько половини органічного вуглецю в біосфері існує у формі целюлози, перетворення целюлози в цінні хімічні речовини, в т.ч. біополімери має велике значення [19, 20].

Геміцелюлоза – другий за поширеністю полімер. На відміну від целюлози, геміцелюлоза має неупорядковану і аморфну структуру, яка складається з декількох гетерополімерів, включаючи ксилан, галактоманнана, глюкуроноксиан, арабіноксиан, глюкоманнан і ксилоксиан. Геміцелюлози листяних порід дерев містять в основному ксилан, тоді як геміцелюлози хвойних

порід містять в основному глюкоманнан. Гетерополімери геміцелюлози складаються з різних 5- і 6-вуглецевих моносахаридних одиниць: пентози (ксилоза, арабіноза), гексози (манноза, глюкоза, галактоза) і ацетильованих цукрів. Геміцелюлоза вмонтовується в стінки рослинних клітин, утворюючи складну мережу зв'язків, які забезпечують структурну міцність за рахунок зв'язування целюлозних волокон у мікрофібри і зшивання їх з лігніном [21].

Лігнін являє собою тривимірний полімер фенілпропаноїдних сполук. Він діє як клітинний клей, який забезпечує міцність рослинної тканини і окремих волокон, жорсткість клітинної стінки і стійкість до комах і патогенів [22].

Таким чином, майбутні розробки в області підвищення цінності лігноцелюлозної біомаси безпосередньо пов'язані з поліпшеннями в області хімічного і мікробного синтезу.

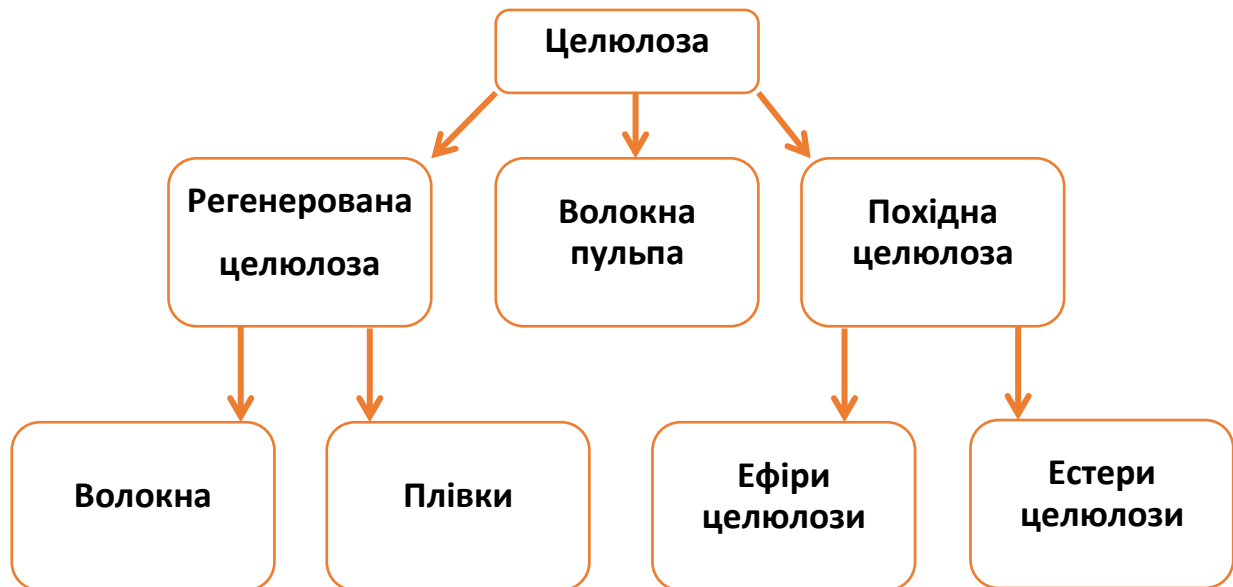
Завдяки недавнім досягненням в цих областях кількість і різноманітність хімічних сполук на основі лігноцелюлозної біомаси швидко збільшується. Крім того, були розроблені технології біопереробки для очищення лігноцелюлозної біомаси для виробництва зеленого палива і біопластику. Збільшується кількість пілотних і демонстраційних проектів, пов'язаних з біопереробкою. Так, Ligno1, Verenium і Mascoma є багатообіцяючими компаніями, які прагнуть зайнятися розробкою технологій біопереробки для виробництва біопалива, біохімічних речовин і біопластику з нехарчової целюлозної сировини. Найбільші світові хімічні компанії, такі як DuPont, BASF, SABIC, Dow Chemical, LyondellBasell і Mitsubishi Chemical, також активно працюють в галузі переробки лігноцелюлозної біомаси. Вже налагоджено біологічне виробництво різних речовин, таких як етанол, бутанол, молочна кислота, левулінова кислота, сорбіт, гліцерин, 1,3-пропандіол, ітаконова кислота, бурштинова кислота і 2,5-FDCA [23, 24].

Завдяки дослідженням і розробкам, багато інших хімічних речовин, які отримані з лігноцелюлозної біомаси, все ще чекають на комерційне виробництво. Очікується, що в найближчому майбутньому існуючі хімічні полімери будуть замінені їх аналогами на основі біомаси. Наприклад, поліетилен, отриманий з нафти, може бути легко замінений біополіетиленом. Було показано, що біополіетилен має точно такі ж хімічні, фізичні і механічні властивості, що і нафтохімічний поліетилен. В якості іншої перспективи на майбутнє існуючі звичайні полімери також можуть бути замінені їх новими альтернативами на біологічній основі. Наприклад, 100 % поліетилен-фураноат (ПЕФ) компанії Avantium може потенційно замінити ПЕТ.

Однак кінцевий комерційний успіх біопластика буде залежати від трьох чинників: економіка, продуктивність і навколишнє середовище. Поки, що перший фактор є найбільш суттєвим, оскільки доведено, що біополімери демонструють аналогічні характеристики і суттєву екологічність у порівнянні з їх аналогами на нафтовій основі. Економічні міркування можна поліпшити за

рахунок безперервних досліджень і розробок, а також інвестицій з боку уряду і приватного сектора. На щастя, останні тенденції дозволяють припустити, що ми знаходимося на шляху створення світової економіки, заснованої на біотехнологіях, і лігноцелюлозна біомаса може зіграти велику роль в цьому контексті.

На сьогодні, в якості основної сировини для виробництва біопластику з альтернативних ресурсів розглядається целюлоза, яку можна використовувати в промисловості у вигляді регенерованої целюлози і похідних целюлози (рис. 3).



**Рис. 3. Полімерні матеріали на основі целюлози [25]**

Регенерація целюлози це процес, в результаті якого целюлоза хімічно розчиняється і знову реструктурується у вигляді волокон або плівки. Найбільш відомими представниками цієї групи матеріалів є віскоза, віскозний шовк, а також деякі інші волокна. Для отримання плівок використовуються гідрат целюлози. Найвідоміша із цих плівок – целофан [25].

У промисловому використанні важливу роль відіграють похідні целюлози. Їх поділяють на дві основні групи – прості ефіри целюлози і складні ефіри (естери) целюлози. Для виробництва біопластику складні ефіри целюлози мають значно більше значення. Першим термопластичним матеріалом був целулоїд, якій містить 75 % нітрату целюлози (отриманого з азотної кислоти і целюлози) і 25 % камфори. В основному складні ефіри целюлози отримують у результаті етерифікації целюлози органічними кислотами – ацетатом целюлози (целюлоза з оцтовою кислотою), пропіонатом целюлози (з пропіоновою кислотою) і бутилатом целюлози (з олійною кислотою).

Як відмічалось раніше, лігноцелюлозна біомаса в основному складається з трьох полімерів: целюлоза, геміцелюлоза і лігнін разом з невеликими кількостями інших компонентів, таких як ацетильна група, мінерали і фенольні сполуки. Залежно від типу лігноцелюлозної біомаси ці полімери організовані в

складні неоднорідні тривимірні структури різного ступеня і з різним відносним складом [26].

Лігнін з трьох компонентів найбільш стійкий до деградації, а целюлоза більш стійка до гідролізу, порівняно з геміцелюлозами [27]. Метою процесу попередньої обробки є видалення лігніну і геміцелюлози (тому цей вид попередньої обробки також називають делігніфікація), зниження кристалічності целюлози, а також збільшення пористості лігноцелюлозних матеріалів. Відомі різні типи методів делігніфікації: фізичні, фізико-хімічні, хімічні, біологічні та електричні або їх поєднання [28]. Але видалення лігніну вимагає значних витрат енергії і призводить до утворення великої кількості стічних вод [29]. З технічної точки зору процес видалення лігніну складний та затратний [30].

Як уже згадувалося, використання лігноцелюлозних біомаси для отримання біополімерів передбачає ферментативну або хімічну попередню обробку для її фракціонування на три основні компоненти – целюлоза, геміцелюлози і лігнін [31]. Різна лігноцелюлозна біомаса містить не однакову кількість компонентів. Так, у ваті бавовни вміст целюлози досягає 95 %, в деревних порід – від 40 до 54 %, при цьому вміст лігніну сягає більше 20 % (за винятком тополі). У сільськогосподарських відходах целюлози містяться до 40 %, лігніну в середньому до 15 % [32]. Багаторічні трав'янисті біоенергетичні культури займають проміжне положення (табл. 3).

В університеті Вагенінгена порівнювали вихід біопластиків із різних сільськогосподарських культур та міскантусу (рис. 4). Встановлено, що біоенергетичні культури можуть бути доброю альтернативою для виробництва біопластику [11].

Біоенергетичні культури міскантус та світчграс на відміну від сільськогосподарських відходів може виявитися перспективним способом залучення нових джерел високоякісної целюлози для виробництва біопластика.

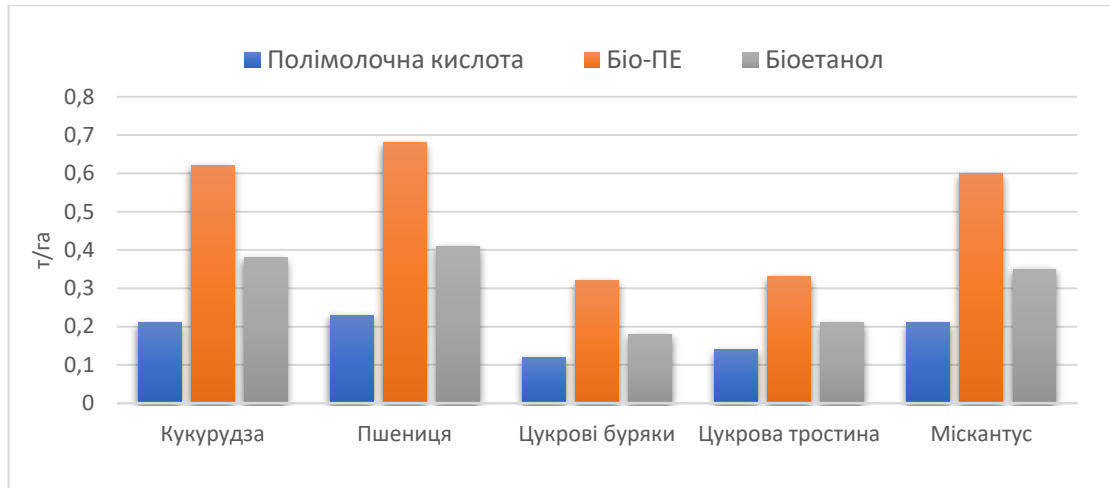
*Таблиця 3*

**Типи лігноцелюлозних біомас та їх хімічний склад**

Лігноцелюлозна біомаса	Целюлоза (%)	Геміцелюлоза (%)	Лігнін (%)
Тверда деревина			
Дуб	40,4	35,9	24,1
Евкالیпт	54,0	18,4	21,5
М'яка деревина			
Тополя	50,8-53,3	26,2-28,7	15,5-16,3
Сосна	42,0-50,1	24,0-27,0	20,0
Біоенергетичні культури			
Міскантус	45,0-52,0	24,0-32,0	9,0-12,0
Світчграс	35,0-40,0	25,0-30,0	15,0-20,0
Сільськогосподарські відходи			
Пшенична солома	35,0-39,0	23,0-30,0	12,0-16,0



Ячмінна солома	36,0-43,0	24,0-33,0	6,3-9,8
Вівсяна солома	31,0-35,0	20,0-26,0	10,0-15,0
Житня солома	36,2-47,0	19,0-24,5	9,9-24,0
Початки кукурудзи	33,7-41,2	31,9-36,0	6,1-15,9
Стебла кукурудзи	35,0-39,6	16,8-35,0	7,0-18,4
Солома сорго	32,0-35,0	24,0-27,0	15,0-21,0



**Рис. 4. Ефективність використання земель для виробництва полімолочної кислоти, біо-ПЕ та біоетанолу**

Оскільки для сільськогосподарських відходів вартість кінцевої продукції формується витратами доставки сировини до виробництва. Водночас, міскантус та світчграс характеризуються багаторічною високою врожайністю [33, 34].

Останнім часом біопластики, посилені лігніном, привернули увагу дослідників в усьому світі. Оскільки, лігнін займає друге місце за вмістом у біомасі рослин після целюлози і є найпоширенішим природним ароматичним ресурсом [35, 36]. Було підраховано, що в паперовій промисловості є близько 70 мільйонів тонн лігніну в рік [37, 38]. Однак тільки 2% його переробляється і утилізується у вигляді лігніну, решта використовується як паливо [39].

Багато досліджень проводяться з метою використання лігніну в якості біокомпозиту у складі біопластику, через його широку доступність, високі механічні властивості, здатність до біорозкладання [40, 41, 42]. Лігнін може діяти як пластифікатор, стабілізатор або біосумісний агент, що надає біопластику різні властивості. Однак, через складну структуру, можливість отримання технічного лігніну для біопластику в даний час є проблематичним. Вважається, що прості модифікації лігноцелюлозних волокон, які істотно не змінюють хімічний вміст або склад волокон, дуже перспективні для створення більш функціональних груп волокон, схильних до взаємодії з біопластиком.

**Висновки.** У світу щороку виробляється 300 млн.т. пластмас, майже 80% з яких викидається на звалища. До 2050 року буде накопичено до 12 млрд. т пластикових відходів, що не піддаються біологічному розкладанню. В той же

час, пластмаси на біологічній основі поки що суттєво дорожчі, ніж пластмаси на основі викопних матеріалів і за своїми механічними або фізичними показниками не повністю відповідають вимогам виробництва.

Сьогодні біопластики, в основному виробляються з відновлюваної, багатого вуглеводами сировини, таких як цукор-сирець з цукрової тростини або цукрових буряків, або декстрази з кукурудзяного крохмалю чи крохмалю маніюки. У перспективі масове використання такої сировини для виробництва біопластика та біопаливо може суттєво вплинути на ціни продуктів харчування і землекористування. Тому, застосування лігноцелюлозної біомаси для виробництва біопластика є хорошою альтернативою, головним чином через її доступність і неконкурентність із запасами продовольства.

Не зважаючи на те, що з лігноцелюлози отримано понад 200 сполук, підвищення цінності лігноцелюлозної біомаси все ще залишається проблемним. Проводиться велика кількість досліджень з підвищення ефективності і зменшення витрат при перетворенні лігноцелюлозної біомаси в хімічні сполуки і полімери, головним чином розділити лігноцелюлозу на три основних компоненти: целюлоза, геміцелюлози і лігнін.

Тополя та міскантус можуть бути перспективними культурами для виробництва біопластику, оскільки вони характеризуються високим вмістом целюлози і геміцелюлози та багаторічною високою врожайністю біомаси.

## References

1. Thielen M. (2014). Bioplastics: Plants And Crops, Raw Materials, Products, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2014, 64 p.
2. Thakur, V.K., Thakur, M.K., Raghavan, P., Kessler, M.R. (2014). Progress in Green Polymer Composites from Lignin for Multifunctional Applications: A Review. ACS Sustain. Chem. Eng. 2014, 2, 1072–1092.
3. Vengal, J.C., Srikumar, M. (2005). Processing and Study of Novel Lignin-Starch and Lignin-Gelatin Biodegradable Polymeric Films. Trends Biomater. Artif. Organs 2005, 18, 237-241.
4. Ching, Y.C., Ershad, A., Luqman, C.A., Choo, K.W., Yong, C.K., Sabariah, J.J., Chuah, C.H., Liou, N.S. (2016). Rheological properties of cellulose nanocrystal-embedded polymer composites: A review. Cellulose 2016, 23, 1011-1030
5. Choo, K.W., Ching, Y.C., Chuah, C.H., Sabariah, J., Liou, N.S. (2016). Preparation and characterization of polyvinyl alcohol-chitosan composite films reinforced with cellulose nanofiber. Materials 2016, 9, 644.
6. Ashiqur, R., Ching, Y.C., Kuan, Y.C., Awanis, N., Ashok, K.C., Cheng, H.C., Nai-Shang, L. (2015). Surface modification of natural fiber using Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> composite for photocatalytic self-cleaning. BioResource 2015, 10, 7405–7418.
7. Nurfatihah, A.B., Ching, Y.C., Luqman, C.A., Chantara, T.R., Nor Azowa, I. (2015). Thermal and dynamic mechanical properties of grafted kenaf filled poly(vinyl chloride)/ethylene vinyl acetate composites. Mater. Des. 2015, 65, 204-211.
8. Sarasini, F., Tirillò, J., Puglia, D., Dominici, F., Santulli, C., Boimau, K., Valente, T., Torre, L. (2017). Biodegradable polycaprolactone-based composites reinforced with ramie and borassus fibres. Compos. Struct. 2017, 167, 20-29.

9. Brodin, M., Vallejos, M., Opedal, M.T., Area, M.C., Chinga-Carrasco, G. (2017). Lignocellulosics as sustainable resources for production of bioplastics—A review. *J. Clen. Prod.* 2017, 162, 646-664.
10. Plastics Europe, 2015. Plastics – the Facts 2015 – An analysis of European plastics production, demand and waste data, [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151216062602-plastics\\_the\\_facts\\_2015\\_final\\_30pages\\_14122015.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20151216062602-plastics_the_facts_2015_final_30pages_14122015.pdf).
11. Van den Oever M., Molenveld, K., Van der Zee M., Bos, H. (2017). Bio-based and biodegradable plastics - Facts and Figures, Wageningen Food & Biobased Research number 1722, 65 p.
12. Ochi, S. (2006). Development of high strength biodegradable composites using Manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2006, 37, 1879-1883.
13. Stevens, E.S., Klamczynski, A., Glenn, G.M. (2010). Starch-lignin foams. *Express Polym. Lett.* 2010, 4, 311-320.
14. Acquavia, M.A., Pascale, R., Martelli, G., Bondoni, M., Bianco, G. (2021). Natural Polymeric Materials: A Solution to Plastic Pollution from the Agro-Food Sector. *Polymers* 2021, 13,158. <https://doi.org/10.3390/polym1301015>
15. Bioenergy value chain 5: sugar to alcohols <http://www.biofuelstp.eu/biochemical-production.html>
16. Saha, B.C. (2005). Enzymes as Biocatalysts for Conversion of Lignocellulosic Biomass to Fermentable Sugars, *Handbook of Industrial Biocatalysis*, ed.C. T. Hou, CRC Press, 2005.
17. Sanz Mirabal, L., Scholz, M., Carus eds. (2020). Market study on Bio-based Polymers in the World – Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020, Nova Institute, 2013.
18. Piotrowski, S., Carus, M., Essel, R. (2015). Global bioeconomy in the conflict between biomass supply and demand, nova paper #7on bio-based economy, nova-Institut GmbH, [http://agricultura.gencat.cat/web/.content/de\\_departament/de02\\_estadistiques\\_observatoris/27\\_butlletins/02\\_butlletins\\_nd/documents\\_nd/fitxers\\_estatics\\_nd/2015/0165\\_2015\\_ERenovables\\_Biomassa\\_biomassa.pdf](http://agricultura.gencat.cat/web/.content/de_departament/de02_estadistiques_observatoris/27_butlletins/02_butlletins_nd/documents_nd/fitxers_estatics_nd/2015/0165_2015_ERenovables_Biomassa_biomassa.pdf).
19. Ragauskas, A. J., Williams, C. K., Davison, B. H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C. A., Frederick, W. J., Hallett, Jr., J. P., Leak, D. J., Liotta, C. L., Mielenz, J. R., Murphy, R., Templer, R. and Tschaplinski T. (2006). *Science*, 2006, 311, 484-489.
20. Taarning, E., Osmundsen, C. M., Yang, X., Voss, B., Andersen S. I. and Christensen, C. H. (2011). *Energy Environ. Sci.*, 2011, 4, 793.
21. Agbor, V. B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A. and Levin D. B. (2011). Biomass pretreatment: fundamentals toward application, *Biotechnol. Adv.*, 2011, 29, 675-685.
22. Rubin, E.M. (2014). Genomics of cellulosic biofuels,” *Nature* 454, 2008, 841-845.
23. The Dow Chemical Company, [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_0100/0901b80380100836.pdf?filepath=/296-01301.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0100/0901b80380100836.pdf?filepath=/296-01301.pdf&fromPage=GetDoc) , Accessed August 15, 2014.
24. Solvay S. A. (2014). [http://www.solvaychemicals.com/Chemicals\\_Literature\\_Documents/Allylic\\_products/APP-2200-0000-W-EN\\_WW\\_.pdf](http://www.solvaychemicals.com/Chemicals_Literature_Documents/Allylic_products/APP-2200-0000-W-EN_WW_.pdf), Accessed August 15, 2014.
25. Endres, H.-J., Siebert-Raths, A. (2009). *Technische Biopolymere*, Carl Hanser Verlag, 2009.
26. Agbor, V.B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A. and Levin, D.B. (2011). Biomass Pretreatment: Fundamentals toward Application. *Biotechnology Advances*, 29, 675-685. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.005>

27. Mäki-Arvela, P., Anugwom, I., Virtanen, P., Sjöholm, R., Mikkola, J. P. (2010). Dissolution of lignocellulosic materials and its constituents using ionic liquids - a review, *Industrial Crops and Products* 2010 Vol.32 No.3 pp.175-201.
28. Ягодин В.И. Основы химии и технологии переработки древесной зелени. Ленинград: Химия, 1981. 224 с. [Yagodin V.I. Fundamentals of chemistry and technology for processing woody greens. Leningrad: Khimiya, 1981. 224 p.] (in Russian)
29. Шитов Ф.А. Технология целлюлозно-бумажного производства. Москва: Лесная промышленность, 1987. 208 с. [Shitov F.A. Pulp and paper production technology. Moscow: Timber Industry, 1987. 208 p.] (in Russian)
30. Fink, H.-P., Engelmann, G., Ebert, A. (2012). Lignin als Polymerwerkstoff, FNR-Fachgespräch Stoffliche Nutzung von Lignin, Berlin, March 2009.
31. Menon, V. and Rao, M. (2012). Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2012, 38, 522-550.
32. Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals, *Energy Convers. Manage.*, 2010, 51, 1412-1421.
33. Вирощування біоенергетичних культур: монографія / за ред. к.с.-г.н. М. Я. Гументика / [М. Я. Гументик, Б. М. Радейко, Я. Д. Фучило, В. М. Сінченко, О. М. Ганженко та ін.]. К.: ТОВ «ЦП «Компринт», 2018. 178 с. [Cultivation of bioenergy crops: monograph / edited by Ph.D. M. Ya. Humentyk / [M. Ya. Humentyk, B. M. Radeyko, Y. D. Fuchylo, V. M. Sinchenko, O. M. Hanzhenko and others]. Kyiv: CP "Comprint" LLC, 2018. 178 p.] (in Ukrainian)
34. Міскантус в Україні: монографія / [М. В. Роїк, В. М. Сінченко, В. І. Пиркін, В. М. Квак та ін.]. К.: ФОП Ямчинський О. В., 2019 256 с. [Miscanthus in Ukraine: monograph / [M. V. Roik, V. M. Sinchenko, V. I. Pyrkin, V. M. Kwak and others]. K.: FOP Yamchynskyi O. V., 2019 256 p.] (in Ukrainian)
35. Holmgren, A., Brunow, G., Henriksson, G., Zhang, L., Ralph, J. (2006). Non-enzymatic reduction of quinone methides during oxidative coupling of monolignols: Implications for the origin of benzyl structures in lignins. *Org. Biomol. Chem.* 2006, 4, 3456-3461.
36. Duval, A., Molina-Boisseau, S., Chirat, C. (2013). Comparison of Kraft lignin and lignosulfonates addition to wheat gluten-based materials: Mechanical and thermal properties. *Ind. Crops Prod.* 2013, 49, 66-74.
37. Graupner, N. (2008). Application of lignin as natural adhesion promoter in cotton fibre-reinforced poly (lactic acid) (PLA) composites. *J. Mater. Sci.* 2008, 43, 5222-5229.
38. Laurichesse, S., Avérous, L. (2014). Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers. *Prog. Polym. Sci.* 2014, 39, 1266-1290.
39. Duval, A.; Lawoko, M. (2014). A review on lignin-based polymeric, micro- and nano-structured materials. *React. Funct. Polym.* 2014, 85, 78-96.
40. Klapiszewski, Ł., Bula, K., Sobczak, M., Jesionowski, T. (2016). Influence of Processing Conditions on the Thermal Stability and Mechanical Properties of PP/Silica-Lignin Composites. *Int. J. Polym. Sci.* 2016, 2016, 1-9.
41. Nair, S.S., Chen, H., Peng, Y., Huang, Y., Yan, N. (2018). Polylactic Acid Biocomposites Reinforced with Nanocellulose Fibrils with High Lignin Content for Improved Mechanical, Thermal, and Barrier Properties. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2018, 6, 10058-10068.
42. Spiridon, I., Leluk, K., Resmerita, A.M., Darie, R.N. Evaluation of PLA-lignin bioplastics properties before and after accelerated weathering. *Compos. Part B Eng.* 2015, 69, 342-349.

**M. V. Roik<sup>1</sup>, O. M. Hanzhenko<sup>1</sup>, Y. D. Fuchylo<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of bioenergy crops and sugar beets of the NAAS, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*Malyn Vocational College, v. Hamarnya, Zhytomyr region, Ukraine*

## **STATUS AND PROSPECTS OF PRODUCTION OF POLYMER MATERIALS BASED ON RENEWABLE RAW MATERIALS OF BIOLOGICAL ORIGIN**

*The current state and prospects of the production and use of bioplastics based on renewable raw materials of biological origin are analyzed. It is indicated that the accumulation of plastics in the environment is a global problem and if no measures are taken, up to 12 billion tons of plastic waste will accumulate on our planet by 2050. The main problem is that plastics made from oil and gas are not biodegradable, so they cause serious environmental problems. In addition, the decrease in reserves and the increase in the cost of fossil fuels encourage the search for alternative, environmentally friendly and sustainable sources of raw materials for the production of plastics, in particular - on a biological basis. One of the main reasons that such plastics are less common is that they are significantly more expensive than fossil-based plastics. Their advantages include reduced CO<sub>2</sub> emissions, reduced dependence on fossil resources and the possibility of complete recycling after the end of their useful life. Sources of biologically based plastics can be sugar-bearing, starch-bearing crops and lignin-cellulosic materials. Lignocellulosic biomass is the most abundant renewable biomass on Earth, so its use for the production of biopolymers will be crucial in the future. Poplar, as well as miscanthus and switchgrass, can be promising as a source of high-quality cellulose for the production of bioplastics, as they are characterized by high quality raw materials and high biomass yields.*

**Key words:** *bioplastic, cellulose, hemicellulose, lignin, poplar, miscanthus.*