ISSN 0868-854 (Print); ISSN 2413-5984 (*Online*).
Algologia. 2021. 31(1): 80–92
https://doi.org/10.15407/alg31.01.080

Потенціал біорозкладання та властивості біопластику з мікроводоростей

Вонг Ю.С., Рома Д.М.

Факультет біоінженерії та технологій, Малазійський університет Келантана, Джелі 17600, Келантан, Малайзія
yeeching@umk.edu.my

Надійшла до редакції 18.08.2020. Після доопрацювання 04.11.2020. Підписана до друку 13.11.2020. Опублікована 22.03.2021

Реферат. Пластик на основі нафти широко використовується у багатьох галузях промисловості, хоча вінспричиняє забруднення навколишнього середовища, а для його розкладання потрібні сотні років. Ці проблеми стимулювали розробку біопластику, зокрема біополімеру із крохмалю. Виробництво біопластику з крохмалю на харчовій основі, як тапіока та кукурудза, створило конкуренцію за сировину між харчовою та хімічною галузями промисловості. Тому метою нашої роботи було створення біопластику на основі біомаси мікроводоростей, яка є непродовольчою сировиною. У дослідженні застосовували чотири різні типи пластифікаторів, а саме гліцерин, сорбіт, глутаральдегід та поліетиленгліколь (ПЕГ). Мікроводорості, відібрані зі ставка для риб Малазійського університета Келантана, були ідентифіковані під світловим мікроскопом як *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. та *Monoraphidium* sp. і внесені у культуру, де вирощувались протягом 14 днів. Одержану біомасу гомогенізували до пастоподібної консистенції шляхом центрифугування. Випробовували варіанти із різними пластифікаторами та концентраціями біомаси. Розчин перемішували на магнітній мішалці з підігрівом до згортання суміші, а потім одержаний матеріал висушували у печі при 60 ^{o}C. Встановлено, що сорбіт та гліцерин придатні для використання в якості пластифікатора у виробництві біопластику з мікроводоростей. Для глутаральдегіду та ПЕГ результат виявився негативним – біопластик із додаванням цих речовин після процесу сушіння був крихким та йшов тріщинами. Одержані матеріали із сорбітом та гліцерином були протестовані з використанням універсальної машини для випробування на розтяг, ІЧ-спектроскопії Фур'є та експерименту на біорозкладання у грунті. Показано, що нові біосполуки мають високий потенціал застосування у повсякденному житті людини. Біопластик, у якому пластифікатором був сорбіт, завдяки хорошій стійкості до стресів та меншій гнучкості може застосовуватися у виробництві пластмасових виробів, таких як іграшки та предмети побуту. Інший варіант

© Вонг Ю.С., Рома Д.М., 2021

біопластику, в якому використовували гліцерин, може застосовуватися для виробництва поліетиленових пакетів та упаковки для харчових продуктів, оскільки він гнучкий та добре розтягується.

Ключові слова: біопластик, гліцерин, сорбіт, мікроводорості, культивування водоростей

Вступ

У наш час пластик відіграє помітну роль у повсякденному житті людини. Виробництво пластмаси започатковано у 1907 р., коли було виготовлено перший синтетичний пластик бакеліт, і досягло помітних об'ємів у 1950-х рр.– тоді світовий обсяг виробництва складав 2 млн т пластику на рік. За 65 років виробництво пластмас зросло приблизно у 200 разів, до 381 млн т у 2015 р. (Geyer et al., 2017). Колосальна кількість пластику, для виробництва якого використовують викопне паливо, майже не розкладається природним шляхом і призводить до серйозних екологічних проблем світового масштабу.

Вичерпання джерел викопного палива та шкідливий вплив пластику на його основі на навколишнє середовище спонукали до пошуку можливостей отримання пластмаси з матеріалів біологічного походження. Перша спроба виробництва біопластику була здійснена ще в 1941 р. Відтоді виробництво зазнало різноманітних інновацій та помітного розвитку (Rajendran et al., 2012). Сучасне виробництво біопластику швидко розвивається, для отримання біополімерів використовують харчову сировину, як картопляний, кукурудзяний, пшеничний крохмаль та ячмінь. Це викликало занепокоєння, оскільки біопластик, сприяючи зменшенню споживання викопного палива, може водночас загрожувати сировинним джерелам харчової промисловості.

Мікроводорості також можуть бути джерелом біополімерів, при цьому їхнє використання для виробництва біопластику жодним чином не впливатиме на стабільність продовольчого забезпечення у світі, а також на вуглецевий слід. Це відновлюване джерело сировини для біотехнологічних потреб. Культивування мікроводоростей для отримання біомаси дозволяє забезпечити безперервне поповнення виробництва біопластмас необхідною сировиною.

Метою нашого дослідження було вивчення можливості виробництва біопластику із використанням біомаси водоростей як джерела біополімерів, а також проведення порівняльного дослідження деяких сполук, що використовуються як пластифікатори при виробництві біопластмас.

Матеріали та методи

Отримання біомаси мікроводоростей. Матеріалом для дослідження слугувала біомаса мікроводоростей, знайдених у зразках води (об'ємом

10 мл кожен), відібраних у ставку для риб Малазійського університета Келантана. Види мікроводоростей ідентифікували за допомогою світлового мікроскопа.

Для подальшого культивування 9 л води зі ставка із мікроводоростями поміщали у прозорий пластиковий акваріум і змішували з 4 л дистильованої води. Мікроводорості культивували 14 днів при температурі 27–30 ^{o}C, pH 6–8, освітленні інтенсивністю 4000–6000 лк із додаванням комплексу NPK як джерела поживних речовин. Через 14 днів вирощування культуру водоростей центрифугували 15 хв при 18–20 ^{o}C та швидкості 5500 об./хв для отримання гомогенізованої біомаси.

Приготування біопластику. До мензурки об'ємом 250 мл вносили 4 г біомаси мікроводоростей, 1 г крохмалю, 1 мл гліцерину і 44 мл дистильованої води. Одержану суміш перемішували на магнітній мішалці з підігрівом до 90 ^{o}C до моменту її загустіння. Як тільки вміст мензурки згортався та ставав густим, 30 мл розчину наливали в чашку Петрі та поміщали у піч, де пластик підсушували від 45 хв до 1 год при температурі 60 ^{o}C. Ця технологія використовувалась при отриманні біопластику на основі різних концентрацій біомаси та пластифікаторів.

Випробування властивостей одержаних біопластмас: тести на розтягнення та біорозкладання, FTIR спектроскопія. Здатність експериментальних варіантів біопластику до розтягнення випробували за допомогою універсальної машини для випробування на розтяг. Зразки розрізали на фрагменти 7 × 2 см. Верхню і нижню частини зразків обклеювали 1 см двосторонньої стрічки. Це полегшувало розміщення зразків на гідравлічній рукоятці універсальної машини. Товщину зразків вимірювали цифровим штангенциркулем. Зразки розтягували зі швидкістю 3 мм/хв, поки вони не розривалися. Отримані значення подовження при розриві (мм), модуля пружності Юнга (Н/мм^2) та напруги на піку (Н/мм^2) були внесені до таблиці.

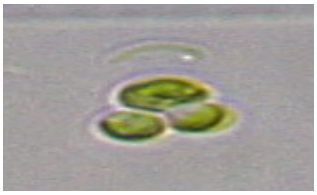
Для визначення здатності отриманих матеріалів до розкладання у природних умовах фрагменти зразків 5 × 3 см закопували у ґрунт на 14 днів. Вимірювали початкову та кінцеву масу зразків, а також pH ґрунту.

Для встановлення хімічного складу отриманих біополімерів використовували інфрачервону спектроскопію з перетворенням Фур'є (FTIR). Зразки розрізали на шматочки 3 × 2 см і поміщали на детектор FTIR. Діапазон довжини хвилі, що використовується для аналізу, становить 400–4000 см$^{-1}$. Отримані результати відображалися на комп'ютерному графіку.

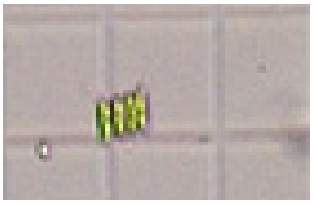
Результати та обговорення

Ідентифікація видів мікроводоростей за зразками води. Змішана культура мікроводоростей, яка слугувала джерелом біомаси для виготовлення

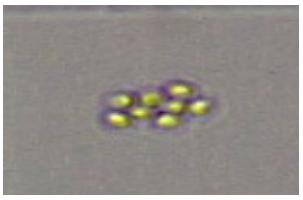
біопластику, була отримана з рибного ставка університетського кампусу. У результаті мікроскопічного дослідження відібраних зразків були виявлені представники одноклітинних зелених мікроводоростей, ідентифіковані як *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. та *Monoraphidium* sp. (див. фото).



Chlorella sp.



Scenedesmus sp.



Monoraphidium sp.

Фото: Мікроводорості, ідентифіковані у пробах води

Ідентифікація видів мікроводоростей у зразках води базувалася на морфологічних характеристиках. *Chlorella* sp. – зелена мікроводорість із клітинами сферичної або овальної форми. У рибному ставку цей одноклітинний мікроорганізм досягав масового розвитку, вірогідно, завдяки великій кількості поживних речовин, що надходять у воду із кормом, а також відходами життєдіяльності риб. Це може бути одним із факторів, що сприяють зростанню *Chlorella* sp. у ставку для риб (Ramaraj et al., 2016). Клітини *Scenedesmus* sp. зазвичай утворювали невеликі ценобії з чотирьох клітин, які плавали на поверхні води. Під час відбору проб поверхня ставка була вкрита зеленою плівкою з мікроводоростей, зокрема, *Scenedesmus* sp. (Unpaprom et al., 2017). Третім видом, виявленим у зразках води, був *Monoraphidium* sp. Клітини цієї зеленої мікроводорості мають викривлену форму та утворюють колонії з кількох клітин (Lin et al., 2019). Рибний ставок можна вважати хорошим місцезростанням для *Monoraphidium* sp., оскільки у його воді міститься багато поживних речовин, таких як азот, фосфор і залізо. Крім риборозведення, їх джерелом також можуть бути добрива з сільськогосподарських угідь, розташованих навколо рибного ставка.

Мікроводорості в культурі. Мікроводорості вирощували в акваріумі при додатковому освітленні й додаванні комплексу NPK як джерела поживних речовин. NPK – це добриво, що широко використовується в сільському господарстві при вирощуванні таких культур, як кукурудза та кава. Добриво NPK містить 15% азоту, 15% фосфору та 15% калію. Воно повністю забезпечує потреби клітин мікроводоростей у поживних речовинах та сприяє масовому розвитку мікроводоростей (Mahmood et al., 2017). Швидкість росту мікроводоростей була величезною (рис. 1) також завдяки швидкій дифузії NPK з води у клітини мікроводоростей. Відомо,

що швидкість поглинання добрива NPK вища у воді порівняно з ґрунтом (Ibiremo, Akanbi, 2016).

Приготування біопластику. В експерименті, для виготовлення біопластику використовували чотири різних типи пластифікаторів у поєднанні із різними ваговими частками біомаси мікроводоростей.

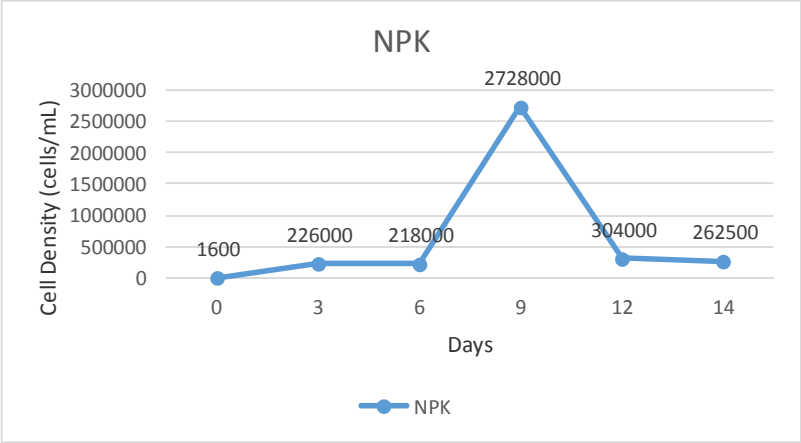


Рис. 1. Приріст мікроводоростей протягом 14 днів за щільністю клітин у культурі

Як показали отримані результати, варіанти біопластику з використанням гліцерину та сорбіту мали кращі показники, ніж ті, що містили глутаральдегід та ПЕГ. Це пов'язано з тим, що гліцерин і сорбіт складаються з гідроксильних груп, які можуть поєднуватися з природним біополімером мікроводоростей, таким як полігідроксибутират (ПГБ), щоб утворити біопластик. На концентрацію ПГБ у мікроводоростях впливають джерела поживних речовин, отриманих мікроводоростями у процесі культивування. Азот і фосфор – два основні поживні елементи, необхідні мікроводоростям для накопичення великої кількості ПГБ (Martins et al., 2017). Тому, культури мікроводоростей, біомасу яких планують використовувати як сировину для отримання біопластмас, потрібно забезпечувати достатньою кількістю фосфору та азоту. Однак існують ще й інші природні біополімери, які містяться у мікроводоростях, – білки та полісахариди. У водоростевих клітинах полісахариди знаходяться як у продуктах запасання, так і в клітинній стінці (Bernaerts et al., 2019).

Суміш для виробництва біопластику, до складу якої в якості пластифікатора входив глутаральдегід, після висушування в печі ставала сухою та крихкою. При додаванні більшого відсотку водоростевої біомаси одержаний біопластик ставав менш крихким порівняно з варіантом, де частка водоростей була меншою. Вірогідно, це пов'язано з присутністю в глутаральдегіді альдегідних груп, які поєднуються з гідроксильними

групами, утворюючи воду. Вода, що утворилася, випарувалась у процесі сушіння в печі, а єдиними речовинами, що залишились, були залишки мікроводоростей. Правильний підбір пластифікаторів дуже важливий, оскільки впливає на пластичність біопластику, його молекулярну структуру, а також на енергію, необхідну для руху молекул (Vieira et al., 2011).

Механічні властивості біопластику за даними для випробування на розтяг. Результати перевірки одержаних сумішей за допомогою універсальної машини для випробування на розтяг свідчать про те, що їх міцність на розрив залежить від концентрації мікроводоростей та використаного типу пластифікатору. Біопластик, що містив сорбіт, виявився стійкішим до розриву порівняно з біопластиком, у якому пластифікатором був гліцерин. Для варіантів біопластику із сорбітом, що містили 80 та 50% мікроводоростей, зафіксовано значну різницю в міцності на розрив, яка становить 1,596. Це значить, що різні концентрації мікроводоростей при приготуванні біопластику впливають на міцність на розрив (рис. 2, 3).

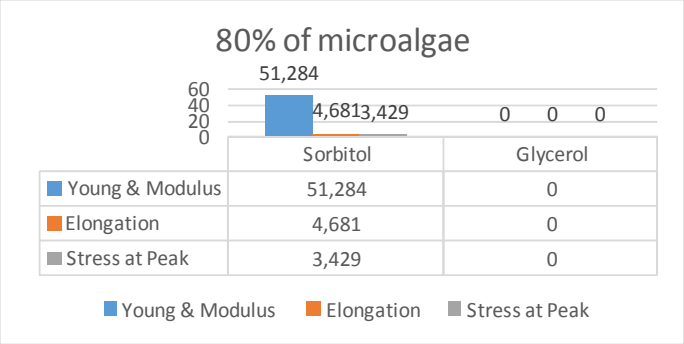


Рис. 2. Порівняння потенціалу біопластику з різним типом пластифікатору та однаковою часткою біомаси мікроводоростей (80%)

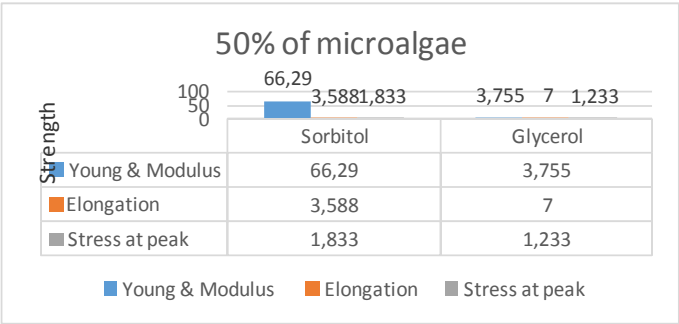


Рис. 3. Порівняння потенціалу біопластику з різним типом пластифікатора та однаковою часткою біомаси мікроводоростей (50%)

Біопластик із додаванням гліцерину має слабшу міцність на розрив порівняно із сорбітом. Різниця у міцності на розрив була значною (0,6). Сорбіт – це різновид поліолів з високою молекулярною масою, яка підвищила міцність на розрив згідно до модуля пружності Юнга і зробила біопластик більш термостабільним (Li et al., 2011) Ось чому сорбіт має кращу міцність на розрив порівняно з гліцерином.

Подовження при розриві означає здатність біопластику повертатися до своєї первісної форми до того, як він розірветься. Біопластмаса, виготовлена з 50% біомаси мікроводоростей з додаванням у суміш гліцерину, показала краще подовження порівняно з біопластиком, у якому використовували сорбіт: порівняно з ним вона подовжується вдвічі. Це пояснюється тим, що гліцерин містить ОН-зв'язки, які можуть зменшити міжмолекулярні зв'язки між матрицями полімерів і замінити їх водневими зв'язками. Результат – зниження жорсткості та збільшення гнучкості біопластику (Muscat et al., 2012). Гліцерин класифікується як зволожувач-пластифікатор, оскільки реагує з водою, збільшуючи м'якість і гнучкість біопластику (Jantrawut et al., 2017), що може бути причиною гірших показників міцності на розрив згідно до модуля пружності Юнга та подовження у біопластику, що складається з 80% біомаси мікро-водоростей. Це пов'язано з тим, що біомаса мікроводоростей, яку використовували в наших експериментах, мала пастоподібну консистенцію та містила велику кількість води. Як тільки гліцерин змішується з пастою на основі мікроводоростей, він утворює дуже м'який і крихкий біопласт (Tian et al., 2017).

Модуль пружності Юнга характеризує жорсткість і міцність біопластику. Нижче значення цього показника свідчить про його більшу гнучкість. Що стосується жорсткості, варіанти біопластику, виготовленого з додаванням сорбіту, є жорсткішими (51,284 та 66,29) для обох концентрацій мікроводоростей порівняно з біопластиками, в яких пластифікатором був гліцерин (6,639). Додавання сорбіту в суміш впливало на водневий зв'язок між полімерами матриць. Водневі зв'язки стають міцнішими і одночасно послаблюють початковий водневий зв'язок матриць (Tian et al., 2017). Це призводить до отримання більш жорсткого та крихкого біопластику.

Аналіз інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR). Аналіз проводили на свіжій біомасі мікроводоростей. Смуга між 3402,66 та 3281,37 см$^{-1}$ продемонструвала наявність розтягуючого зв'язку О–Н, тоді як смуга 2918,90 см$^{-1}$ показала наявність згинального зв'язку С–Н (табл. 1). Мікроводорості містять полісахарид, який складається з трьох різних елементів, а саме С, О і Н (Johnsson, Steuer, 2018), а тому очікується наявність зв'язків О–Н і С=С (внаслідок присутності полісахариду мікроводоростей). Отже, аналіз чітко показав наявність у біомасі мікроводоростей органічних сполук на основі вуглеводнів. Згинання

зв'язків між спектрами 1702,18 і 1229,29 см $^{-1}$ свідчило також про присутність інших зв'язків, таких як C=O і C–O.

Суміш для виробництва біопластику містить чотири основні складові: мікроводорості, крохмаль, пластифікатор (гліцерин або сорбіт) та дистильовану воду для їх поєднання.

Таблиця 1. **Класифікація типів зв'язків та функціональних груп**

Довжина хвилі, см$^{-1}$	**Тип зв'язку**	**Функціональна група**
3550–3200	O─H	Спирт
3000–2840	C─H	Аліфатична сполука
1740–1720	C=O	Карбоніл
1662–1626	C=C	Алкени
1650–1566	C=C	Алкени
1420–1330	O─H	Спирт
1275–1200	C─O	Ефір
1075–1020	C─O	Ефір

Всі додані речовини є органічними сполуками, що складаються з таких елементів, як вуглець, водень та кисень. Хімічна формула гліцерину – $C_3H_8O_3$, тоді як хімічна формула сорбіту – $C_6H_{14}O_6$. За результатами FTIR аналізу, у біопластику зв’язок O–H виявляється при 3277,69 та 1336,31 см$^{-1}$. Це свідчить про наявність вільної гідроксильної групи, яка дозволяє біопластику поглинати воду та забезпечує високу здатність до біологічного розкладання (Lebreton et al., 2018). У в біопластиках є також інші зв'язки, такі як зв'язок C–H при 2926,78 см$^{-1}$, C=C при 1644 см$^{-1}$ та зв'язок C–O при 1150,31 і 1077,04 см$^{-1}$. Таким чином, дані ІЧ-спектроскопії Фур’є доводять, що і гліцерин, і сорбіт взаємодіють із біомасою мікроводоростей, утворюючи зв'язки, що призводять до утворення біопластичної плівки (рис. 4).

Тест на біорозкладання. Для визначення здатності отриманих варіантів біопластмаси до розкладання природним шляхом ми використовували метод випробування ISO 11266 (табл. 2). Згідно з цим методом, зразок біопластику вміщують в аеробний шар ґрунту, що забезпечує процес біодеградації. Зразки шести різних варіантів біопластику витримували у грунті протягом 14 днів; за методикою, зміну ваги зразків відстежували за даними їх зважування у перший, сьомий та чотирнадцятий день тесту (табл. 3). Як видно з таблиці, вага всіх зразків зменшилася на 7-й день перебування у грунті, що свідчило про їх деградацію. Нам не вдалося одержати вагові показники зразків на 14-й день випробувань, оскільки у ґрунті, куди їх закопали, не виявлено жодних слідів їхньої присутності.

Відсоток швидкості біологічного розкладу біопластику з додаванням гліцерину та сорбіту зростав зі збільшенням частки мікроводоростей у зразках. Це свідчить про те, що кількість біомаси в продукті прямо впливає на швидкість його біодеградації (див. табл. 3). Відомо, що мікроводорості мають високий вміст ПГБ, полімеру класу поліефірів, який підвищує біологічну здатність пластмас до розкладання (Abdou et al., 2019).

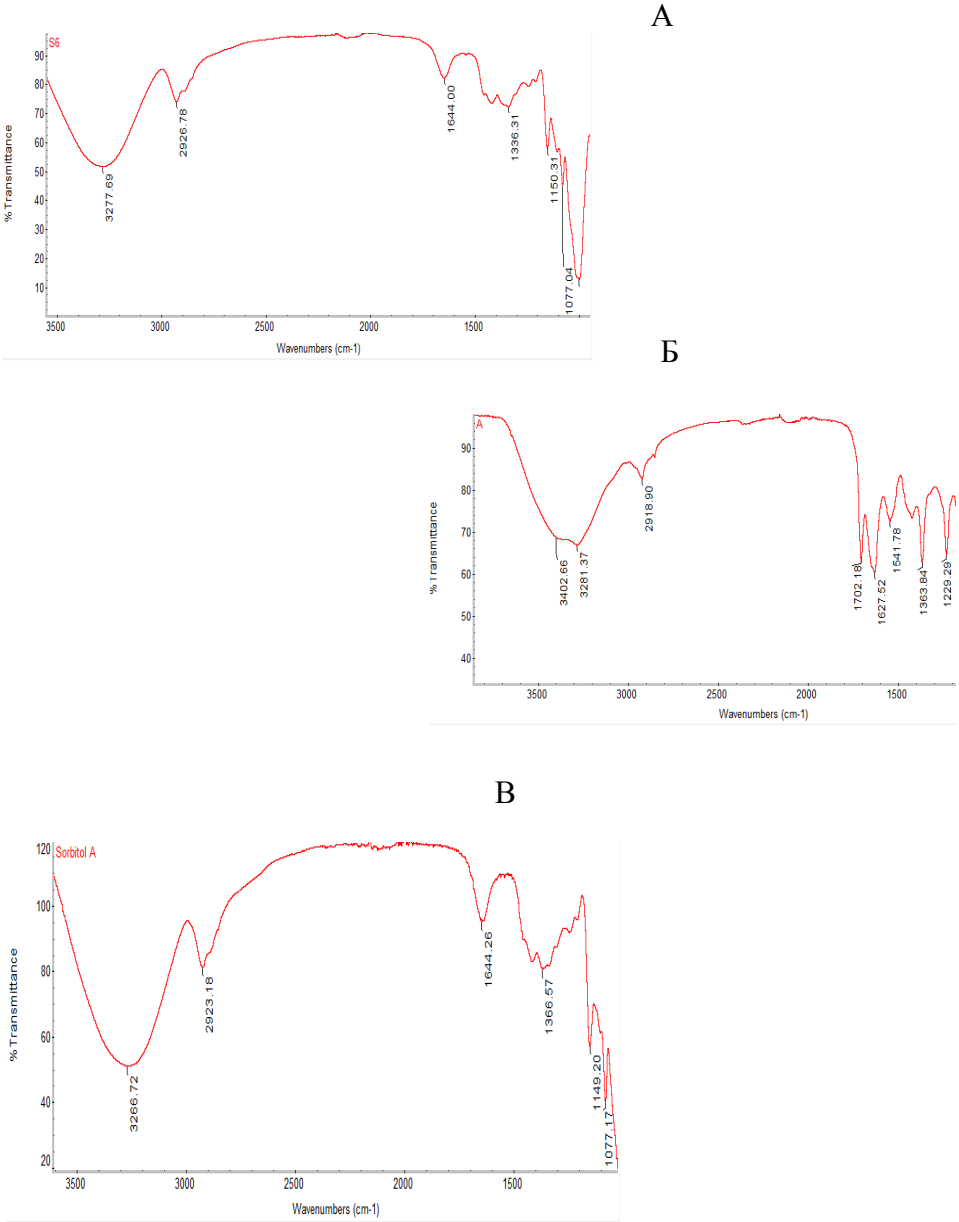


Рис. 4. Результати FTIR аналізу: свіжа біомаса мікроводоростей (*А*); біопластик з додаванням гліцерину (*Б*) та сорбіту (*В*)

Таблиця 2. **Перелік стандартів для випробувань біологічного розкладання (Briassoulis et al., 2014)**

Стандарт	Назва
Американське товариство з випробування матеріалів (ASTM)	
ASTM D 5988-12	Стандартний метод випробувань для визначення аеробної біодеградації пластичних матеріалів у ґрунті
Міжнародні стандарти	
ISO 17556-2012	Пластмаси. Визначення максимальної здатності до аеробного біологічного розкладання пластикових матеріалів у ґрунті шляхом вимірювання респірометром потреби у кисні або кількості виділеного двуокису вуглецю
ISO 11266-1994	Якість ґрунту. Керівництво щодо лабораторних випробувань на біодеградацію органічних хімічних речовин у ґрунті в аеробних умовах
Французькі та італійські організації з нормалізації (AFNOR, UNI)	
NF U52-001 лютий 2005	Біодеградуючі матеріали для використання у сільському господарстві та садівництві. Вироби для мульчування – вимоги та методи випробувань
UNI 11462:2012	Біодеградуючі у ґрунті пластичні матеріали – типи, вимоги та методи випробувань
Організація економічного співробітництва та розвитку (OECD). Керівництво	
304A	Властивість біорозкладання у ґрунті
307	Аеробна та анаеробна трансформація у ґрунті

Таблиця 3. **Швидкість біологічного розкладання біопластику (за стандартом ISO 17556-2012)**

Зразок		Вага зразка, г		Швидкість біодеградації	
Пласти-фікатор	Біомаса мікро-водоростей, %	1-й день	7-й день	Різниця у вазі	%
Гліцерин	0	0,216	0,135	0,081	37,5
	50	0,209	0,118	0,091	43,54
	80	0,376	0,120	0,256	68,09
Сорбіт	0	0,194	0,112	0,082	42,27
	50	0,182	0,106	0,076	41,76
	80	0,257	0,118	0,139	54,09

Отже, збільшення концентрації мікроводоростей у біопластику сприяє пришвидченню його переробки мікроорганізмами в природі.

Як видно з табл. 3, біопластик з мікроводоростей, в якому пластифікатором був гліцерин, має вищу швидкість біологічного розкладання у верхньому шарі ґрунту порівняно з використанням сорбіту як пластифікатору. Це пояснюється тим, що гліцерин має кращі гігроскопічні властивості, завдяки чому пластифікований гліцерином біопластик має вищу швидкість поглинання води порівняно з сорбітом (Ooi et al., 2012). Отже, кліматичні явища, такі як дощі, сприяють потраплянню води в біопластик і скорочують тривалість його деградації. Іншими факторами, які можуть сприяти деградації біопластиків, є pH, а також концентрація бактеріальної біомаси у ґрунті (Adhikari, Hartemink, 2016).

Заключення

Дослідження показали, що гліцерин і сорбіт придатні для використання в якості пластифікаторів при виготовленні біопластику з мікроводоростей. При цьому сфери застосування біопластиків на основі цих двох речовин відрізняються. Біопластик на основі гліцерину підходить для виробництва поліетиленових пакетів або плівки для зберігання харчових продуктів, оскільки є більш гнучким порівняно з біопластиком на основі сорбіту. Останній поступається гнучкістю, проте має кращу міцність на розрив та розтягнення, ніж біопластик із додаванням гліцерину. Збільшення частки мікроводоростей у складі біопластику збільшує швидкість його розкладання у природі завдяки наявності у біомасі додаткових природних біополімерів, таких як полісахариди. На здатність біопластику до біодеградації впливають також гігроскопічні властивості обох пластифікаторів, які сприяють розчинності біопластику при змішуванні з водою.

Автори висловлюють щиру вдячність вченим факультету біоінженерії та технології Малазійського університету Келантана, Кампус Джелі за фінансову підтримку та сприятливі умови при дослідженні.

Список літератури

Abdou A., Koali F., Abdo A., Jamoos A. 2019. *Overlay cognitive radio based on UFMC system*: Proc. 6th Int. conf. Electrical and Electronics Engineer (Turkey, 16–17 April, 2019).

Adhikari K., Hartemink A.E.J.G. 2016. Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma.* 262: 101–111.

Bernaerts T.M., Gheysen L., Foubvert I., Hendrickx M.E., Van Loey A.M.J.B. 2019. The potential of microalgae and their biopolymers as structuring ingredients in food: A review. *Biotechnol Adv.* 37(8): 107419.

Briassoulis D., Mistriotis A., Mortier N., De Wilde B. 2014. *Standard testing methods and specifications for biodegradation of bio-based materials in soil – a comparative analysis*: Proc. Int. conf. Agricultural Engineering (Zurich, 6–10 July, 2014). Zurich.

Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L.J.S. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3(7): e1700782.

Ibiremo O., Akanbi O. 2016. Soil properties and nutrient uptake of coffee seedlings as influenced by NPK Fertilizer Formulations in Ibadan, Southwest, Nigeria. *Brit. J. Appl. Sci. Technol.* 12(3): 1–8.

Jantrawut P., Chaiwarit T., Jantanasakulwong K., Brachais C.H., Chambin O.J.P. 2017. Effect of plasticizer type on tensile property and in vitro indomethacin release of thin films based on low-methoxyl pectin. *Polymers*. 9(7): 289.

Johnsson N., Steuer F. 2018. Bioplastic material from microalgae: Extraction of starch and PHA from microalgae to create a bioplastic material.

Lebreton L., Slat B., Ferrari F., Sainte-Rose B., Aitken J., Marthouse R., Levivier A. 2018. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci. Rep.* 8(1): 1–15.

Li H., Huneault M.A. 2011. Comparison of sorbitol and glycerol as plasticizers for thermoplastic starch in TPS/PLA blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 119(4): 2439–2448.

Lin Y., Ge J., Zhang Y., Ling H., Yan, X., Ping W. 2019. Monoraphidium sp. HDMA-20 is a new potential source of α-linolenic acid and eicosatetraenoic acid. *Lipids in Health and Disease*. 18(1): 56.

Mahmood K.H., AL-Mashhadani, Khudhair E.M. 2017. Experimental study for commercial fertilizer NPK (20: 20: 20+ te N: P: K) in microalgae cultivation at different aeration periods. *J. Chem. Petrol. Engineer.* 18(1): 99–110.

Martins R.G., Gonçalves I.S., Morais M.G., Costa J.A. 2017. New technologies from the bioworld: selection of biopolymer-producing microalgae. *Polimeros*. 27(4): 285–289.

Muscat D., Adhikari B., Adhikari R., Chaudhary D.J.J. 2012. Comparative study of film forming behaviour of low and high amylose starches using glycerol and xylitol as plasticizers. *J. Food Engineer.* 109(2): 189–201.

Ooi Z.X., Ismail H., Bakar A.A., Aziz N.A. 2012. Properties of the crosslinked plasticized biodegradable poly (vinyl alcohol)/rambutan skin waste flour blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 125(2): 1127–1135.

Rajendran N., Puppala S., Sneha Raj M., Ruth Angeeleena B., Rajam C. 2012. Seaweeds can be a new source for bioplastics. *J. Pharm. Res*. 5(3): 1476–1479.

Ramaraj R., Unpaprom Y., Dussadee N. 2016. Cultivation of green microalga, *Chlorella vulgaris* for biogas purification. *Int. J. New. Technol. Res.* 2(3): 117–122.

Tian H., Liu D., Yao Y., Ma S., Zhang X., Xiang A. 2017. Effect of sorbitol plasticizer on the structure and properties of melt processed polyvinyl alcohol films. *J Food Sci.* 82(12): 2926–2932.

Unpaprom Y., Ramaraj R., Whangchai K. 2017. A newly isolated green alga, *Scenedesmus acuminatus*, from Thailand with efficient hydrogen production. *Chiang Mai J. Sci.* 44(4): 1270–1278.

Vieira M.G.A., Silva M.A., Santos L.O., Beppu M.M. 2011. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. *Eur. Polym. J.* 47(3): 254–263.

Wang K. 2014. *Bio-plastic potential of spirulina microalgae.* Athens: Univ. Georgia.

Підписала до друку О.К. Золотарьова

Wong Y.C., Roma D.N. 2021. **Potential of the biodegradability and characteristics of bioplastic from microalgae residues**. *Algologia*. 31(1): 80–92.

Faculty of Bioengineering and Technology, University Malaysia Kelantan,
Jeli Campus, Jeli 17600, Kelantan, Malaysia

Petroleum-based plastic has been widely used in many industries. However, it takes hundreds of years to degrade and causes widespread pollution to our environment. These problems led to the invention of bioplastics, which were comprised of natural biopolymers made from starch. The production of bioplastics from food-based starches such as tapioca and corn created competition between food and bioplastic production industries. Hence, this research study focuses on producing bioplastic from microalgae residue, which is a non-food based raw material that uses four different types of plasticizers: glycerol, sorbitol, glutaraldehyde and polyethylene glycol (PEG). Microalgae species for identification were obtained from the fish pond at the University Malaysia of Kelantan, before cultivating the species for 14 days. The microalgae residues were extracted through the centrifugation process. Three species were identified under the light microscope, *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. and *Monoraphidium* sp. The production of bioplastic involved a manual stirring method using a hotplate magnetic stirrer, followed by drying the bioplastic in an oven at 60 ^{o}C. Results obtained showed that sorbitol and glycerol from microalgae are suitable to be used as a plasticizer for the production of bioplastic, however glutaraldehyde and PEG are not suitable. Bioplastics that used PEG and glutaraldehyde became cracked and brittle after the drying process. The characterization of bioplastics includes universal tensile testing machines, Fourier-transform infrared analysis and biodegradability tests being processed//undertaken on glycerol-based and sorbitol based bioplastic. Characterization of bioplastics proved that both glycerol and sorbitol have high potential for applications in daily human life. Bioplastics which used sorbitol as a plasticizer could be used in can be applied the production of plastic goods such as toys and household items due to its good resistance toward stress and minimal flexibility. Meanwhile bioplastics which used glycerol as a plasticizer could be applied to the production of plastic bags and plastic food wrap due to its elastic and flexible nature.

K e y w o r d s : bioplastic; glycerol; sorbitol; microalgae; algal cultivation