

БІОКОНВЕРСІЯ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНИХ ВІДХОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРИБІВ РОДУ *TRICHODERMA* ТА *ASPERGILLUS*

Дзюбенко Вікторія

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
vika93347@gmail.com

Лігноцелюлоза є найпоширенішою складовою біомаси, а її перетворення на біопаливо має велике значення для зменшення викидів вуглецю. Проте її складна структура зумовлює низьку ефективність і високу вартість ферментативного гідролізу. Основними чинниками стійкості є кристалічність целюлози, заміщення ксилану арабінозою та складна мережа полімерів, яку можна частково подолати попередньою обробкою біомаси [1].

Попри подібний склад трав'янистої біомаси, різні методи попередньої обробки суттєво змінюють її структуру, що впливає на індукцію ферментів, проте цей вплив досі недостатньо досліджений. Для створення ефективних ферментних коктейлів важливо встановити взаємозв'язки між властивостями індукторних субстратів і секреторами мікроорганізмів, що руйнують лігноцелюлозу [3].

Наразі застосовуються різні методи розщеплення складної структури лігніну з метою підвищення доступності целюлози та геміцелюлози для дії мікробних ферментів. Ці методи поділяються на фізичні, хімічні, фізико-хімічні та біологічні, серед яких найефективнішою вважається комбінована хімічно-біологічна обробка [2]. Хімічна передобробка руйнує структуру лігноцелюлози, прискорюючи її подальшу біодеградацію, тоді як біологічна базується на дії ферментів і метаболітів мікроорганізмів, забезпечуючи екологічно безпечну, хоча й повільнішу, трансформацію.

Одним із ефективних біотехнологічних підходів є твердофазна ферментація (ТФФ), під час якої мікроорганізми метаболізують лігноцелюлозу, підвищуючи вміст білків і цукрів у субстраті та збагачуючи його поживну цінність. Серед мікроорганізмів, здатних до деградації лігноцелюлози, особливу увагу привертають гриби м'якої гнилі — представники аскоміцетів і дейтероміцетів, зокрема роди *Trichoderma* та *Aspergillus*. Вони ефективно розкладають целюлозу та геміцелюлозу й частково — лігнін. Серед них *Trichoderma reesei* є одним із найвивченіших продуцентів целюлаз і геміцелюлаз, що визначає його як основний штам для промислового виробництва ферментів. Подібні властивості мають також *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma viride* та *Trichoderma asperellum* [4].

В дослідженнях для твердофазної ферментації (SSF) соломи рисової (WS) та WS, попередньо обробленої 3% NaOH, використовували *T. asperellum*. Штам демонстрував високу здатність до деградації лігноцелюлози завдяки потужній ферментативній активності та секретував повний набір лігноцелюлозолітичних ферментів (гідролази, естерази, ліази, оксидоредуктази, лігнінмодифікуючі пероксидази), що робить його перспективним для виробництва ферментів. Попередня обробка WS дозволяла зменшити втрати продуктів ферментації.

Для культивування використовували картопляно-декстрозний бульйон (PDB) та агар (PDA). Міцеліальні гранули отримували шляхом перенесення частини колонії на PDB і культивування при 30°C на струшувачі 5 днів, після чого гранули фільтрували для інокуляції. До чашок із 10 г WS (обробленого та необробленого) додавали поживний розчин (глюкоза 0,025 г/мл; сульфат амонію 0,015 г/мл; дикалійфосфат та сульфат магнію по 0,0025 г/мл) у співвідношенні 1:2, перемішували з міцелієм та інкубували при 30°C.[4]

Традиційно компоненти рослинної біомаси, такі як целюлоза та геміцелюлоза, за допомогою ефективних ферментних коктейлів, що виробляються мікробними клітинними фабриками розкладаються на моносахариди. Моносахариди потім використовуються для живлення інших мікробних клітинних фабрик, наприклад, *Saccharomyces cerevisiae*. Нещодавно ефективний та економічно вигідний альтернативний підхід пропонує використовувати олігосахариди, отримані з частково деградованого лігноцелюлозного матеріалу, замість моносахаридів для ферментації.

Сконструйований штам *Aspergillus niger*, вирощений на лігноцелюлозному субстраті, продукує спеціалізований ферментний коктейль для часткової деградації лігноцелюлози. Використання цього секретому для обробки біомаси цукрової тростини забезпечує підвищене співвідношення целоолігосахариди/глюкоза, що свідчить про ефективність видалення певних ферментативних компонентів. Гриб демонструє високу пластичність, секретуючи альтернативні целюлази та ферменти, активні щодо другорядних компонентів клітинної стінки, без порушення росту на рослинній біомасі. Це доводить здатність штаму використовувати целооолігосахариди як джерело вуглецю. Таким чином, делеція екзоферментів є перспективним підходом для створення спеціалізованих коктейлів, придатних для одержання олігосахаридів із рослинної біомаси. Отримані результати підкреслюють адаптивність грибів і відкривають можливості для виробництва пребіотиків, косметичних засобів і біопалива на основі олігосахаридної ферментації [1].

Підводячи висновок можна сказати, що лігноцелюлоза є найпоширенішою складовою біомаси та перспективним відновлюваним джерелом вуглецю для виробництва біопалива. Проте її складна полімерна структура ускладнює ефективний ферментативний гідроліз. Поєднання хімічної попередньої обробки з біологічною деградацією підвищує ефективність перетворення біомаси, зменшуючи кристалічність целюлози та руйнуючи зв'язки між лігніном і полісахаридами. Перспективним напрямом також є створення генетично модифікованих штамів здатних продукувати селективні ферментні коктейлі для часткової деградації лігноцелюлози з утворенням олігосахаридів. Це відкриває нові можливості для одержання пребіотиків, біопалива та біоактивних сполук.

ЛІТЕРАТУРА

1. de Figueiredo, F. L., Contesini, F. J., Terrasan, C. R. F., Gerhardt, J. A., Corrêa, A. B., Antoniel, E. P., Wassano, N. S., Levassor, L., Rabelo, S. C., Franco, T. T., Mortensen, U. H., & Damasio, A. (2024). Engineering the secretome of *Aspergillus niger* for cellooligosaccharides production from plant biomass. *Microbial Cell Factories*, 23(1), 323. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02578-9>.
2. Mohanram, S., Rajan, K., Carrier, D. J., Nain, L., & Arora, A. (2015). Insights into biological delignification of rice straw by *Trametes hirsuta* and *Myrothecium roridum* and comparison of saccharification yields with dilute acid pretreatment. *Biomass and Bioenergy*, 76, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.02.031>
3. Zhang, Y., Wang, R., Liu, L., Wang, Y., Yang, J., & Yuan, H. (2023). Distinct lignocellulolytic enzymes produced by *Trichoderma harzianum* in response to different pretreated substrates. *Bioresource Technology*, 382, 128990. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128990>
4. Zhu, Q., Liu, W., Song, L., Guo, Z., Bian, Z., Han, Y., Cai, H., Yang, P., & Meng, K. (2025). The potential of *Trichoderma asperellum* for degrading wheat straw and its key genes in lignocellulose degradation. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1550495. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1550495>