

ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ВИРОБНИЦТВО БІОЕТАНОЛУ

Байдур К.О., Стецюк А.В., Коломацький Н.К.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, catherinebaidur@gmail.com

Abstract

Theoretical grounds for the prospects of using biofuels are provided. The analysis focuses on the efficiency features of bioethanol production, with particular attention to the impact of ultrasonic irradiation during enzymatic hydrolysis of biomass. It is demonstrated that cavitation flow under high acoustic pressure facilitates the uniform distribution of the investigated medium.

Keywords: *bioethanol, ultrasonic influence, cavitation.*

Вступ. Біоетанол є найбільш широко використовуваним біопаливом для транспортування в усьому світі. Його виробництво з біомаси є одним із способів зменшити як споживання сирової нафти, так і забруднення навколишнього середовища. Біоетанол, як правило, виробляється шляхом мікробної ферментації цукрів, що зброджуються, таких як глюкоза, до етанолу [1].

Сировину, з якої виробляють біоетанол, поділяють на три категорії: прості цукри, крохмаль і лігноцелюлоза. Однією з основних проблем виробництва біоетанолу є потреба у великій кількості сировини [2]. Саме тому важливо дослідити шляхи підвищення ефективності даного виробництва задля його оптимізації та заощадження ресурсів.

Одним з таких способів є використання ультразвуку з метою підвищення виходу продуктів гідролізу. Існує велика кількість досліджень, які вказують на позитивний ефект використання ультразвуку порівняно з тими випадками, коли він не застосовувався. Ультразвукове опромінення є перспективною технологією для використання у ферментативних реакціях завдяки його позитивному впливу на вихід реакції [3].

Матеріали та методи. Вплив ультразвукового опромінення на ферментативний гідроліз жому цукрової тростини було оцінено для отримання зброджуваних цукрів. Вплив температури, концентрації ферменту та вмісту вологи оцінювали з ультразвуковим опроміненням і без нього. Вихід гідролізу, досягнутий за допомогою ультразвукового опромінення, був значно вищим, ніж без нього. Найбільша кількість зброджуваних цукрів, отриманих під впливом ультразвуку, становила 0,26 г [цукру] г⁻¹ [сухої цукрової тростини], що приблизно вдвічі перевищує значення, отримане без його впливу [3].

Швидкість реакції та масообмін були покращені завдяки використанню ультразвуку, який є допоміжним джерелом енергії (перемішування та/або нагрівання) у ферментативних реакціях шляхом утворення мікробульбашок під час обробки ультразвуком через явище кавітації [4]. На рис. 1 представлено каскадний ультразвуковий випромінювач із блоком генератора, на якому проводяться дослідження на кафедрі біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського. Частота каскадних випромінювань коливається в діапазоні 20 - 40 кГц. Відомо, що застосування ультразвукової попередньої обробки може значно збільшити перетворення крохмальних матеріалів у глюкозу, а також загальний вихід біопалива [5, 6].



Рис. 1. Каскадний ультразвуковий випромінювач та генератор

Також проводяться дослідження впливу гідролізу ямсу за допомогою ультразвуку для отримання зброджуваних цукрів з використанням фосфорної кислоти або ферментів як каталізаторів. У хімічному та ферментативному гідролізах оцінювали вплив температури та концентрації каталізатора на кількість вивільненого цукру, що зброджується. Такі експерименти проводилися з впливом ультразвуком так і без нього. Для хімічного гідролізу максимальна кількість зброджуваних цукрів становила 0,155 г цукру на $г^{-1}$ сухого матеріалу та 0,205 г цукру на $г^{-1}$ сухого матеріалу. Для ферментативного гідролізу максимальні отримані зброджувані цукри становили 0,32 г/г та 0,42 г/г без і з ультразвуком відповідно. Як результат, завдяки ультразвуку підвищився вихід продукту, показавши перспективність технології [7].

Коли ультразвукова хвиля низької частоти (тобто потужний ультразвук у діапазоні від 16 до 100 кГц) поширюється в середовищі, такому як рідина або суспензія, це створює кавітацію та акустичний потік. Як вже згадувалося раніше, утворюються великі кавітаційні бульбашки, які призводять до підвищення температури та тиску в зоні кавітації. Основною перевагою потоку при обробці, наприклад, кукурудзяної суспензії є змішування, яке сприяє рівномірному розподілу енергії ультразвуку в масі суспензії, кращому масовому переміщенню

ферментів та розсіюванню будь якого нагрівання, що виникає. Унаслідок дії ультразвуку полегшується розпад гранул кукурудзяного крохмалю, тим самим піддаючи ферментам набагато більшу площу поверхні та підвищуючи активність ферментів під час гідролізу. Аналізуючи таку обробку ультразвуком при виробництві біоетанолу, можна стверджувати про те, що загальний вихід етанолу стає значно збільшений за короткий час обробки [6, 8].

Інтенсивність кавітації експоненційно залежить від відстані до джерела ультразвуку (чим ближче - тим краще). Через це ультразвукова обробка великого об'єму суспензії за допомогою точкового джерела є неефективною. У такому випадку потрібно використовувати спеціально розроблені ультразвукові реактори, які мають не одне, а декілька джерел ультразвукових хвиль [9, 10].

Кавітаційні ефекти ультразвукової обробки створюють "гарячі точки" високої температури та тиску в суспензії [11, 12]. У реакційних системах з інтенсивною ультразвуковою обробкою кількість "гарячих точок" визначає продуктивність реактора [13].

Результати та обговорення. Для оптимізації процесу потрібно дослідити кореляцію між найважливішими параметрами системи, такими як амплітуда коливань, тиск, температура та склад суспензії. На цьому етапі рекомендується переходити від пульсуючого ультразвукового впливу до неперервного, оскільки такий важливий параметр як тиск, не можна змінювати під час пульсуючого впливу [14].

За умови успішної оптимізації процесу подальше масштабування є доволі простим, оскільки залежність синтезу біоетанолу від інтенсивності ультразвукового впливу є лінійною [15].

Висновки. Використання ультразвуку в обробці сировини - це енергоємний процес. Ресурси, що йдуть на обробку, включаючи енергетичні затрати, - це основний фактор, який визначає, чи є ультразвукова обробка вигідною порівняно з альтернативними методами. Споживання електроенергії передусім залежить від потужності ультразвукового джерела, тривалості обробки та об'єму суспензії, що обробляється [16]. Такі процеси потребують використання ультразвукових реакторів [17, 18, 19].

Список використаної літератури:

1. J. Timothy, J. Daniel, J. Martin. Production of Bioethanol. A Review of Factors Affecting Ethanol Yield. 2021. Vol 7(4). P. 268.
2. Balat Mustafa. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. 2011. Vol. 52. P. 858-875.
3. Felipe C. Lunelli, Pâmela Sfalcin, Matheus Souza. Ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for the production of fermentable sugars. Biosystems Engineering. 2014. Vol. 124. P. 24-28.
4. Igor Korobiichuk, Viktorij Mel'nick, Zhanna Ostapenko, Ludmila Ruzhinska. Study of heat and mass transfer processes during extraction of plant raw materials under the influence of ultrasound/ Ultrason Sonochem. 2023 Aug. V.98:106512. doi:10.1016.
5. Sen Ma, Xiao-li Xue, Shu-juan Yu. High-intensity ultrasound irradiated modification of sugarcane bagasse cellulose in an ionic liquid. Industrial Crops and Products. 2012. Vol. 35. P. 135-139.

6. Svetlana Nikolić, Ljiljana Mojović, Marica Rakin. Ultrasound-assisted production of bioethanol by simultaneous saccharification and fermentation of corn meal. *Food Chemistry*. 2010. *Food Chemistry*. Vol. 122. P. 216-222.
7. Adriana P. Ramón, Leonardo Taschetto, Felipe Lunelli. Ultrasound-assisted acid and enzymatic hydrolysis of yam (*Dioscorea* sp.) for the production of fermentable sugars. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2015. Vol. 4. P. 98-102.
8. Alex Patist, Darren Bates. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2008. Vol. 9. P. 147-154.
9. Chisti Y. Sonobioreactors: using ultrasound for enhanced microbial productivity. *Trends Biotechnol* 2003;21: 89-93.
10. Gogate PR, Wilhelm AM, Pandit AB. Some aspects of the design of sonochemical reactors. *Ultrason Sonochem* 2003; 10:325–330.
11. Suslick KS. The chemical effects of ultrasound. *Scientific American* 1989; 260:80–86
12. Gogate PR, Mujumdar S, Pandit AB. Large scale sonochemical reactors for process intensification: design and experimental validation. *J Chem Tech Biotechnol* 2003; 78:685–693.
13. Saez V, Frías-Ferrer A, Iniesta J, Gonzalez-García J, Aldaz A, Riera E. Characterization of a 20 kHz sonoreactor. Part I: analysis of mechanical effects by classical and numerical methods. *Ultrason Sonochem* 2005; 12:59–65.
14. Sulaiman, A. Z.; Ajit, A.; Yunus, R. M.; Cisti, Y. (2011): Ultrasound-assisted fermentation enhances bioethanol productivity. *Biochemical Engineering Journal* 54/2011. pp. 141–150.
15. Luft, L., Confortin, T.C., Toderò, I. et al. (2019): Ultrasound Technology Applied to Enhance Enzymatic Hydrolysis of Brewer's Spent Grain and its Potential for Production of Fermentable Sugars. *Waste Biomass Valor* 10, 2019. 2157–2164.
16. Karki B, Lamsal BP, Jung S, van Leeuwen J, Pometto III AL, Grewell D, Khanal SK. Enhancing protein and sugar release from defatted soy flakes using ultrasound technology. *J Food Eng* 2010; 96:270–278.
17. Gogate PR, Mujumdar S, Pandit AB. Large scale sonochemical reactors for process intensification: design and experimental validation. *J Chem Tech Biotechnol* 2003; 78:685–693.
18. Gogate PR, Sutkar VS, Pandit AB. Sonochemical reactors: Important design and scale up considerations with a special emphasis on heterogeneous systems. *Chem Eng J* 2011; 166:1066–1082.
19. Chivate MM, Pandit AB. Effect of hydrodynamic and sonic cavitation on aqueous polymeric solutions. *Ind Chem Eng* 1993; 35:52–58.