

STUDY OF THE ENZYMATIC EXTRACTION OF PLANT ANTIOXIDANTS

A. Demydova

National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute"

T. Nosenko, Y. Shemanska

National University of Food Technologies

Key words:

Vegetable antioxidants
Enzymatic extraction
Cellulose
Pectinase
Lecithin
Induction period
Antioxidant activity

Article history:

Received 05.07.2023
Received in revised form
21.07.2023
Accepted 08.08.2023

Corresponding author:

Y. Shemanska

E-mail:

shemanska@ukr.net

Citation: А. О. Демидова, Т. Т. Носенко, Є. І. Шеманська (2023). Дослідження ефективності ферментативного екстрагування рослинних антиоксидантів. *Наукові праці НУХТ*, 29(4), 137—1147.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-4-13

ABSTRACT

One of the directions of "green technologies" is the use of safe solvents in combination with enzymes to extract antioxidants from plant raw materials. This work was aimed on the study of the influence of hydrolytic enzymes (cellulases, pectinases, β -glucanases, and xylanases) on the process of antioxidant extraction. To extract the lipophilic antioxidants sunflower gummies were also used as a source of phospholipids. Enzymes resulted in a significant increase in antioxidants recovery from viburnum bark and burdock root compared to water-ethanolic extraction. For viburnum bark, this increase was 186% (5.67 and 3.05 g/kg, respectively), and for burdock roots — 144% (7.79 and 5.41 g/kg, respectively). The effect of the obtained extracts on the process of sunflower oil oxidation was also investigated by the volumetric method under the conditions of initiated oxidation. The burdock root extract obtained by enzymatic extraction had 9% higher efficiency of inhibition of sunflower oil oxidation compared to the traditional water-ethanolic quote, for viburnum bark this increase was 12.4%. The investigated plant extracts were in the order of decreasing antioxidant activity: burdock roots (enzymatic extraction, antioxidant activity 2.88) > viburnum bark (enzymatic extraction, antioxidant activity 2.820 > burdock roots (conventional extraction, antioxidant activity 2.64) > viburnum bark (conventional extraction, antioxidant activity 2.51) > butyl hydroxy anisole, (antioxidant activity 1.69).

Thus, enzymatic extraction in the presence of phospholipids is an effective method of accelerating of the natural antioxidant extraction from plant materials.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФЕРМЕНТАТИВНОГО ЕКСТРАГУВАННЯ РОСЛИННИХ АНТИОКСИДАНТІВ

А. О. Демидова

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Т. Т. Носенко, Є. І. Шеманська

Національний університет харчових технологій

Одним з напрямків «зелених технологій» є застосування безпечних екстрагентів у поєднанні з ферментами для вилучення антиоксидантів з рослинної сировини. В статті досліджено вплив гідролітичних ферментів (целюлази, пектинази, β -глюканази і ксиланази) на процес екстрагування антиоксидантів. З метою вилучення ліпофільних антиоксидантів з рослинної сировини застосовували також соняшниковий гідратаційний осад як джерело фосфоліпідів. Ферментативне екстрагування показало суттєве збільшення екстрагування антиоксидантів з кори калини та коріння лопуха порівняно з водно-спиртовим екстрагуванням. Для кори калини ця різниця становила 186% (5,67 та 3,05 г/кг, відповідно), для коріння лопуха — 144% (7,79 та 5,41 г/кг, відповідно). Було досліджено також вплив одержаних антиоксидантів на процес окиснення соняшникової олії волюметричним методом в умовах ініційованого окиснення. Екстракт коріння лопуха, вилучений ферментативним екстрагуванням, мав на 9% вищу ефективність гальмування окиснення соняшникової олії порівняно з традиційним водно-спиртовим екстрактом, для кори калини ця різниця становила 12,4%. Досліджені екстракти рослин за зменшенням антиоксидантної активності знаходяться в порядку: коріння лопуха (ферментативне екстрагування, антиоксидантна активність 2,88) > кора калини (ферментне екстрагування, антиоксидантна активність 2,82) > коріння лопуха (звичайне екстрагування, антиоксидантна активність 2,64) > кора калини (звичайне екстрагування, антиоксидантна активність 2,51) > бутилгідроксианізол, антиоксидантна активність 1,69).

Отже, ферментативне екстрагування в присутності фосфоліпідів є ефективним методом інтенсифікації екстрагування природних антиоксидантів з рослинної сировини.

Ключові слова: рослинні антиоксиданти, ферментативне екстрагування, целюлаза, пектиназа, лецитин, період індукції, антиоксидантна активність.

Постановка проблеми. Біологічно активні компоненти рослин, зокрема антиоксиданти (АО), позитивно впливають на стан здоров'я людини — завдяки знешкодженню вільних радикалів знижують ризик хронічних захворювань, таких як рак, хвороби серця, інсульт та хвороба Альцгеймера (Vaiserman та ін., 2020). При застосуванні АО в харчових продуктах здійснюється подвійний ефект — позитивний вплив АО на показники окиснення жирів і посилення антиоксидантного захисту організму людини.

Кора або листя багатьох рослин характеризуються максимальною антиокси-

дантною активністю їх екстрактів (Demydova, Aksonova, & Kameneva, 2022). Однак ці частини рослин є важко проникними для розчинників завдяки міцним клітинним оболонкам. У зв'язку з цим актуальною проблемою є інтенсифікація процесу екстрагування біологічно цінних компонентів із такої сировини. Запропоноване введення емульгатора в нашому дослідженні не лише підтримує стабільність суміші водно-спиртовий розчин АО-олія, але й можливо має позитивний вплив на сам процес екстрагування АО з рослинної сировини. Крім того, пропонується використати високоенергетичний метод емульгування за допомогою гомогенізації з високою енергією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гідролітичні ферменти мають здатність руйнувати клітинні стінки і мембрани рослин, що забезпечує краще вивільнення біоактивних речовин, зокрема АО. Такі ферменти, як пектинази, целюлази, гідролази й амілази, широко використовуються для руйнування клітинних стінок у технології підготовки сировини до вилучення олії (Nosenko, Vovk, & Koroluk, 2019), для обробки соків та освітлення пива і підвищення вилучення соку. Недавні дослідження екстракції за допомогою ферментів показали інтенсифікацію екстрагування, зменшене використання розчинника та зменшення споживання енергії порівняно з неферментативними методами (Shamraja, & Virendra, 2019).

Найбільш поширеними АО рослин є фенольні сполуки (Sharma, Cheng, & Chakkaravarthi, 2019). Здебільшого фенольні сполуки ковалентно зв'язані зі структурними компонентами клітинної стінки, такими як целюлоза, геміцелюлоза та пектин.

У дослідженнях (Meini, Cabezudo, & Romanini, 2019) виявлено, що целюлаза не має ефекту при окремому застосуванні, тому застосовували комплекс ферментів. Для максимально ефективного вилучення АО з рослин було вирішено застосувати як оптимальні ферменти суміш целюлази (каталізує гідроліз целюлози на моноцукри) та пектинази (каталізує гідроліз пектину). Вони руйнують клітинні оболонки (целюлоза і пектин є основними полімерними компонентами клітинних стінок рослин) і дають змогу підвищити вилучення у екстракт як гідрофільних, так і гідрофобних речовин. Як джерело целюлази було вирішено використати комплексний ферментний препарат Целлолюкс-А, який окрім целюлазної активності проявляє також β -глюканазну і ксиланазну активності. β -глюкани та ксилани також формують, поряд з целюлозою і пектином, стінки рослинних клітин.

З метою підвищення вилучення ліпофільних антиоксидантів з рослинної сировини вирішено застосувати в суміші екстрагентів також лецитин. Одержаний продукт містить природний емульгатор, що дає змогу застосовувати одержану композицію як АО і для емульсій та жирів. Як відомо, лецитин здатен підтримувати у стабільному стані наноемульсії, тобто за певних умов дає змогу підтримувати, наприклад, у стабільному стані ліпофобні біоактивні речовини в складі жиру. Наноемульгування підвищує стабільність антиоксиданту, його біодоступність (емульсії легко засвоюються організмом), тривалість його прооксидантного впливу, створює більшу поверхню доступу до антиоксиданту та маскує органолептичні особливості антиоксиданту (Sharma, Cheng, & Chakkaravarthi, 2019).

На сьогодні немає даних щодо комплексного впливу пектинази, целюлази, β -глюканазі і ксиланазі на процес вилучення антиоксидантів з рослинної сировини, у тому числі кори калини, коріння лопуха, які за нашими попередніми дослідженнями продемонстрували високі значення антиоксидантної ефективності за умов звичайного екстрагування (Demydova та ін., 2022). Також відсутні порівняльні дані щодо впливу одержаних з/без гідролітичних ферментів екстрактів на гальмування окиснення рослинних жирів.

Корені лопуха великого проявляють антиоксидантну, протизапальну і гіполіпідемічну активність (Опрошанська, Осолодченко, & Хворост, 2021). Переваги кори калини для здоров'я (традиційно використовується для лікування таких захворювань, як кашель, застуда, туберкульоз, ревматичні болі, виразка, проблеми зі шлунком і нирками) є наслідком наявності біоактивних компонентів, таких як фенольні сполуки, вітамін С, каротиноїди, іридоїди та ефірні олії (Kajszczak, Zakłós-Szyda, & Podsędek, 2020). Кора калини за дослідженням (Polka, Podsędek, & Koziołkiewicz, 2019) характеризується вищим за інші частини цієї рослини вмістом флаванолів (перш за все катехіну), містить більше кислот, які проявляють АО властивості. Катехін і хлорогенова кислота — основні феноли цієї рослини.

Мета статті: застосувати ферментне екстрагування для максимально ефективного вилучення АО з рослинної сировини, одержати порівняльні дані вилучення біоактивних речовин в умовах звичайного та ферментативного водно-спиртового екстрагування, а також дослідити антиоксидантні ефекти одержаних екстрактів щодо окиснення рослинного жиру.

Матеріали і методи. Як модель окиснення використовували рафіновану дезодоровану соняшникову олію (ТМ «Олейна»). Пляшку відкривали перед початком дослідження і зберігали при температурі $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ без доступу світла не більше чотирьох тижнів.

Рослинна сировина (кора калини, коріння лопуха) була придбана в аптеках України. Всі рослини було подрібнено на висушено при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ під потоком повітря у витяжній сушильній шафі до вмісту вологи $\leq 1\%$. Рослинну сировину подрібнювали за допомогою лабораторного млина (марка RRH — 100, Україна, кількість обертів за хвилину — 28000, потужність — 700 W). Зразки просіювали через лабораторне сито з отворами = 1 мм та зберігали за температури $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ і використовували протягом чотирьох тижнів. Перед початком екстрагування всю рослинну сировину розтирали у ступці протягом 20 секунд.

Як джерело фосфоліпідів застосовували соняшниковий гідратаційний осад, наданий українським виробником. Склад: вода — 65,5%, фосфоліпіди — 19,7%, нейтральні ліпіди — 12,1%. Свіжий гідратаційний осад зберігався при температурі $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ без доступу світла не більше чотирьох днів.

Як джерело целюлази, β -глюканазі і ксиланазі був використаний комплексний ферментний препарат Целлолюкс-А. Як джерело пектинази — ферментний препарат Пектолад. Специфікація наведена у табл. 1.

Для одержання екстрагенту для ферментного екстрагування до суміші етиловий спирт — вода (співвідношення 50:50 відповідно) додавали 1% соняшникового гідратаційного осаду та 0, % суміші Пектоладу і Целлолюксу А (співвідношення 50:50). Одержану суміш гомогенізували за допомогою пропелерної мішалки (OS-20, Ukraine, 200 об/хв) протягом 5 хвилин.

Таблиця 1. Основні характеристики використаних ферментних препаратів

Ферментний препарат	Найменування показників	Характеристика
Целлолюкс-А	Зовнішній вигляд. Колір	Однорідний порошок від світло-кремового до світло-коричневого
	Масова частка вологи, %, не більш	10,0
	Целлололітична активність, одиниць/г	2000 ± 200
	Оптимальні значення: рН температура, °С	4,7 50
Пектолад	Зовнішній вигляд Колір	Однорідний порошок від світло-жовтого до жовто-коричневого кольору
	Масова частка вологи, %, не більш	15,0
	Целлололітична активність, КМЦ	35 од/г
	Оптимальні значення: рН температура, °С	3,7—4,3 25—55

Паралельно проводили екстрагування кори калини або коріння лопуха сумішшю води та етилового спирту (співвідношення 50:50 відповідно) для одержання порівняльних даних.

Для одержання екстрактів підготовлену сировину замочували в одержаному екстрагенті в скляній колбі з метою набрякання сировини. Тривалість замочування — 1 година. Потім підігрівали до 50 °С за допомогою нагрівального елемента магнітної мішалки (RIVA-04.4, RIVA-STAL, Ukraine) та проводили екстракцію впродовж 4 год при постійному перемішуванні. Гідромодуль екстракції становив 1:5 (мас./об.). Контроль температури здійснювали термпарою. Колба була приєднана до повітряного зворотного холодильника. Одержані екстракти відфільтровувались від рослинної сировини через паперовий фільтр (Whatman № 42). Розчинник із фільтрату вилучали у роторному випарнику за температури 40 °С. Одержані концентрати зберігались при –5 °С в закритих скляних бюксах без доступу світла не більше чотирьох тижнів і використовувались в дослідженні кінетики окиснення соняшникової олії.

Антиоксидантну активність (АОА) екстрактів вивчали волюметричним методом у манометричній установці шляхом дослідження кінетики окиснення соняшникової олії. Манометрична установка складається з реакційної комірки об'ємом 5 см³, що термостатується, манометра, системи сполучних скляних трубок і кранів, які приєднані до джерела чистого (99,9%) кисню та вакуумного насоса, а також термостата. Систему скляних трубок установки наповнювали чистим киснем. Вимірювання об'єму поглиненого зразком кисню (в мм³) за певний час здій-

снювали за зміною рівня стовпчика зафарбованої рідини, з'єднаного із реакційною коміркою із зразком олії. Одержані дані кінетики окиснення зразків олії (мм³/хв) перераховували в моль/с.

Об'єм кисню ($V(O_2, \text{ моль/дм}^3)$) розраховували за формулою:

$$V(O_2, \text{ моль/дм}^3) = \Delta V \times 10^{-6} \times 10^3 / (22,4 \times V_{\text{проби}}), \quad (1)$$

де 10^{-6} — коефіцієнт переведення об'єму кисню в дм³; 22,4 — об'єм 1 моллю газу, дм³; $10^3/V_{\text{проби}}$ — коефіцієнт перерахунку кількості поглиненого кисню на 1 дм³ субстрату.

Дослідження проводили в умовах ініційованого окиснення, за рахунок термічного розкладання розчину АІБН (2,2' — азо-біс-ізо-бутіронітрил) у о-ксилолі. Введенням однакової кількості АІБН досягали постійної швидкості ініціювання. Дослідження проводили за температури 70 °С ($\pm 0,1$ °С) та концентрації [АІБН] = $2 \cdot 10^{-3}$ моль/ дм³ для всіх зразків. Графічним методом визначали значення періоду індукції (τ_i) як відрізок осі абсцис, що відсікається перпендикуляром з точки перетину дотичних до кінетичної кривої.

У дослідженнях кінетики окиснення соняшникової олії використовували синтетичний антиоксидант бутилгідроксианізол (0,2 г/кг олії) або одержаний концентрат біоактивних компонентів рослин аналогічної концентрації.

Ефективність гальмування процесу окиснення соняшникової олії позначали як антиоксидантну активність (АОА) і розраховували за формулою:

$$АОА = \tau_i / \tau_s, \quad (2)$$

де τ_i і τ_s — періоди індукції окиснення соняшникової олії з антиоксидантом і без нього відповідно.

Концентрацію антиоксидантів [InH] у моль/дм³ розраховували за формулою:

$$[InH] = \frac{1 \times [АІБН] \times (1 - e^{-K_p \times \tau})}{f} = 0,48 \times [АІБН] \times (1 - 0,9999^\tau), \quad (3)$$

де [АІБН] — концентрація ініціатора, моль/л; K_p — константа швидкості розпаду ініціатору, за $t = 70$ °С, $3,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; $1/f = 0,48$ (1 — вихід радикалів при розпаді однієї молекули ініціатора); τ — експериментально визначений період індукції, с.

Кожен експеримент проводили двічі. У статті вказані середні значення між двома дослідженнями. Середня квадратична похибка визначення не перевищувала 5%.

Викладення основних результатів дослідження. Відомо, що етиловий спирт забезпечує високу ефективність екстрагування фенольних сполук, що підтверджено результатами порівняльного екстрагування кори калини (Paşayeva, Karagenk, & Fatullayev, 2021). Спиртові екстракти мають максимальну антиоксидантну активність порівняно з іншими розчинниками (Robles-Ramírez, Monterrubio-López, & Beltrán-Orozco, 2016). Водночас вода є найбільш безпечним розчинником, проте водне екстрагування не забезпечує ефективного вилучення неполярних або деяких напівполярних сполук. Незважаючи на те, що ферментне екстрагування підвищує вихід екстрактивних речовин і у водному середовищі, є низка праць, які доводять більшу ефективність використання водно-етанольних сумішей у поєднанні з ферментами (Piazza, Romanini, & Meini, 2023). Наприклад, у праці (Meini, Cabezudo, & Romanini, 2019) показано, що водно-спиртове ферментне екстрагування втричі ефективніше за водне.

Параметри екстрагування встановлювали залежно від оптимумів активності ферментів. Як джерело фосфоліпідів використовували соняшниковий гідратаційний осад. Він уже є концентрованою емульсією, не потребує зусиль для розчинення у водно-спиртовому екстрагенті, коштує суттєво дешевше за висушений лецитин.

Ефективність вилучення антиоксидантів оцінювали за впливом одержаних екстрактів на кінетику окиснення соняшnikової олії. Це було зумовлене тим, що на разі антиоксиданти властивості не всіх компонентів рослин відомі, деякі ідентифікувати дуже складно (Saini, Panesar, & Bera, 2019). Крім того, доволі часто між різними антиоксидантами з однієї сировини спостерігається ефект синергізму, тому встановлення безпосередньо антиоксидантної активності одержаних екстрактів є раціональним підходом.

Результати вилучення біоактивних компонентів з кори калини та коріння лопуха наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Порівняльні результати ферментативного і звичайного способів екстрагування

Сировина	Параметри екстрагування	Кількість екстрагованих речовин, г/кг сировини
Кора калини	етиловий спирт:вода = 50:50	3,05±0,40
	етиловий спирт:вода = 50:50 + 1% гідратаційного осаду + 0,1% ферментів	5,67±0,54
Коріння лопуха	етиловий спирт:вода = 50:50	5,41 ±0,36
	етиловий спирт:вода = 50:50 + 1% гідратаційного осаду + 0,1% ферментів	7,79 ±0,48
	етиловий спирт:вода = 50:50 + 0,1% ферментів	7,06 ±0,56

Ферментативне екстрагування показало суттєве збільшення виходу біоактивних речовин з обох видів рослинної сировини. Для кори калини ця різниця склала 186% — з 3,05 до 5,67 г/кг. Для коріння лопуха — 144% — з 5,41 до 7,79 г/кг.

Додавання фосфоліпідів також підвищувало ефективність екстрагування біоактивних компонентів (табл. 2). Без додавання соняшnikового гідратаційного осаду їх вихід для коріння лопуха збільшився лише до 7,06 г/кг.

Дослідження процесу окиснення олії за температури навколишнього середовища та доступі кисню повітря потребує значної тривалості. Встановлення вмісту продуктів окиснення за стандартами Codex Alimentarius не дає повної інформації про ступінь окиснення: пероксидне число вимірює вміст лише первинних продуктів окиснення — гідропероксидів, анізидинове число — лише альдегідів. Утворення інших вторинних продуктів окиснення при не встановлюється, як і їх роль у загальному процесі кінетики окиснення олії. Дослідження кінетики окиснення волюметричним методом інформує про результати загального процесу окиснення, який залежить від сумарного вмісту каталізаторів та інгібіторів окиснення. Вимірювання кількості поглиненого кисню за одиницю часу надає можливість визначити тривалість періоду індукції окиснення. Після завершення періоду індукції починається так зване каталітичне окиснення, що характеризується високою швидкістю окиснення, під час чого спостерігається поглинання кисню

зразком у великих об'ємах. У результаті каталітичного окиснення жир швидко втрачає харчову цінність, накопичує суттєві кількості продуктів окиснення і вже не відповідає вимогам до харчових продуктів (Ghosh, Upadhyay, & Mishra, 2019). У зв'язку з чим саме дослідження тривалості періоду індукції є індикатором ефективності внесених антиоксидантів.

Результати дослідження кінетики окиснення соняшникової олії наведено на рисунку. Період індукції окиснення соняшникової олії без додавання антиоксидантів склав 1420 ± 40 с. Період окиснення соняшникової олії в присутності $0,2$ г/кг бутилгідроксианізола (ВНА) склав 2400 ± 50 с. В присутності такої ж кількості екстрагованих з коріння лопуха антиоксидантів (водно-етанольне екстрагування) період індукції становив 3750 с, а в присутності антиоксидантів з коріння лопуха, екстрагованих в присутності ферментів та гідратаційного осаду, – 4090 с.

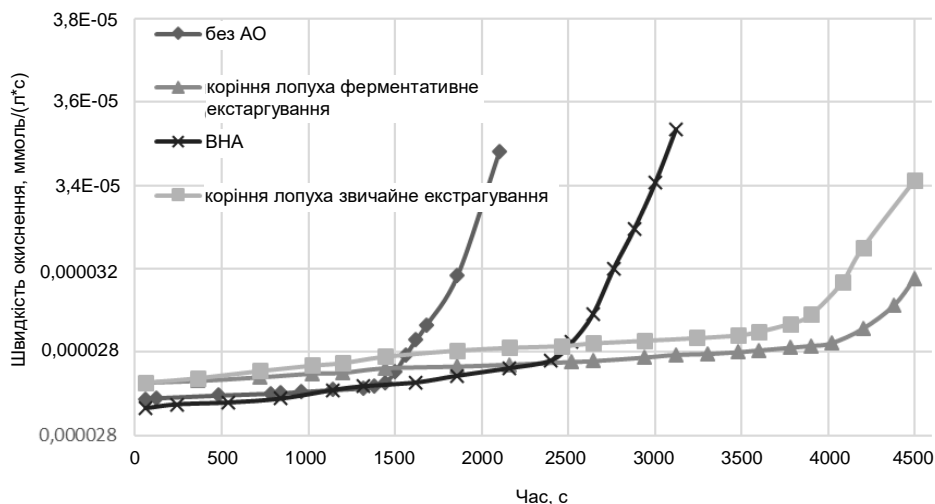


Рис. Кінетика прискореного окиснення соняшникової олії з/без введеними АО (70°C в присутності $2 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³ АІБН)

Імовірно різниця в антиоксидантній активності екстрактів коріння лопуха, одержаних за різних варіантів екстрагування (комплекс АО, одержаний ферментативним екстрагуванням на $9,0\%$ більш ефективний), пояснюється явищем синергізму або вилученням дещо іншого складу АО під впливом ферментів. Під час ферментативного екстрагування спостерігається більше різноманіття вилучених біоактивних речовин, присутні в екстракті фосфоліпіди також проявляють антиоксидантну активність (Sharma, & Chakkaravarthi, 2019).

Результати досліджень зі встановлення тривалості періоду індукції окиснення соняшникової олії в присутності АО з рослин, а також розраховані значення антиоксидантної активності одержаних АО та концентрації інгібіторів у зразках олії з доданими АО наведено у табл. 3. Всі одержані екстракти проявили більшу ефективність як АО порівняно з бутилгідроксианізолом (Е 320). Тобто і кора калини і коріння лопухів за будь-якою обраною технологією екстрагування можуть бути використані як джерело потужних АО.

Таблиця 3. Значення кінетичних параметрів окиснення соняшникової олії в присутності АО та їхньої АОА

Сировина	Параметри екстрагування	Період індукції окиснення соняшникової олії в присутності АО, с	Антиоксидантна активність (АОА)	Концентрація інгібіторів в олії, моль/дм ³
Кора калини	етиловий спирт:вода = 50:50	3560±50	2,51	2,87×10 ⁻⁴
	етиловий спирт:вода = 50:50 + 1% СГ + 0,1% ферментів	4000±60	2,82	3,16×10 ⁻⁴
Коріння лопуха	етиловий спирт:вода = 50:50	3750±90	2,64	3,00×10 ⁻⁴
	етиловий спирт:вода = 50:50 + 1% СГ + 0,1% ферментів	4090 ±60	2,88	3,22×10 ⁻⁴
ВНА	—	2400±50	1,69	2,05×10 ⁻⁴

Примітка: СГ — соняшниковий гідратаційний осад.

Однакові кількості концентратів АО кори калини, вилучених за традиційним екстрагуванням і ферментативним, проявили різну ефективність щодо гальмування швидкості окиснення соняшникової олії: одержаний за ферментативним екстрагуванням комплекс АО був на 12,4% більш ефективним (табл. 3). Комплекс АО коріння лопуха, вилучений за ферментативним екстрагуванням, на 9% більш ефективно гальмує окиснення соняшникової олії порівняно з одержаним традиційним способом. Встановлений вплив пояснюється вищою концентрацією інгібіторів окиснення в екстрактах, вилучених в присутності ферментів. Аналогічні дані були виявлені в дослідженні (Meini, Cabezudo, & Romanini, 2019) щодо значного впливу целюлази на вивільнення p-кумарової кислоти.

Досліджені екстракти слід розташувати за зменшенням АОА в послідовності: коріння лопуха (ферментне екстрагування) > кора калини (ферментне екстрагування) > коріння лопуха (звичайне екстрагування) > кора калини (звичайне екстрагування) > ВНА.

При близькому вмісті інгібіторів окиснення зразків олії з ВНА та екстракту із кори калини (звичайне екстрагування, 2,05×10⁻⁴ та 2,87×10⁻⁴ моль/дм³, відповідно) їх антиоксидантна активність відрізнялась більш суттєво — 1,69 та 2,51, відповідно. Це очевидно пояснюється можливими синергічними ефектами між складовими антиоксидантного комплексу кори калини.

Відомо також, що гідрофільні антиоксиданти мають більшу біодоступність для організму людини, порівняно з гідрофобними. Тому екстракти досліджених рослин є якісною альтернативою таким антиоксидантам як токофероли та каротиноїди, які широко застосовуються у жирових продуктах (Sharma, 2019; Belwal, 2018; Vaiserman, 2020; Nosenko, 2019).

Висновки

Використання гідролітичних ферментів в поєднанні із застосуванням натурального емульгатора — суміші фосфоліпідів підвищує ефективність екстрагування

антиоксидантів із рослинної сировини. Ферментативне екстрагування дає змогу вилучати суттєво більшу кількість біологічно активних речовин порівняно зі звичайним водно-спиртовим екстрагуванням. В присутності 0,1% суміші Пектоладу (містить пектиназу) та Целлюладу А (комплексний ферментний препарат містить целюлазу, β -глюканазу і ксиланазу) та 1% соняшникового гідратаційного осаду вихід біоактивних речовин з кори калини збільшився на 186%. Для коріння лопуха це збільшення становило 144%. Присутність фосфоліпідів також позитивно впливає на ефективність екстрагування — за відсутності соняшникового гідратаційного осаду з коріння лопуха вилучилось лише на 130% більше екстрактивних речовин порівняно зі звичайним водно-спиртовим екстрагуванням.

Ефективність інгібування процесу окиснення соняшникової олії природними антиоксидантами була суттєво вищою порівняно з ефективністю бутилгідроксиданізолу, який подовжував період індукції олії у 1,69 раза. Одночасно екстракти, одержані ферментативним екстрагуванням, мали вищу антиоксидантну активність. Водно-етанольний екстракт кори калини у концентрації 0,2 мг/кг олії подовжував період індукції соняшникової олії у 2,51 раза. Екстракт кори калини, одержаний ферментативним екстрагуванням збільшував тривалість періоду індукції соняшникової олії у 2,82 раза. Для екстрактів коріння лопуха ці значення становили 2,64 та 2,88 раза, відповідно. Отже, поєднання ферментативного екстрагування з використанням фосфоліпідів є ефективним способом інтенсифікації екстрагування природних антиоксидантів із рослинної сировини.

Література

- Опрошанська, Т. В., Осолодченко, Т. П., Хворост О. П. (2021). Антимікробна активність настоек та рідких екстрактів із коренів лопуха великого, лопуха малого та лопуха павутистого. *Фармацевтичний часопис*, 4, 46—52. <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2021.4.12512>.
- Belwal, T., Ezzat, S. M., Rastrelli, L., Bhatt, I. D., Daglia, M., Baldi, A. ... Atanasov A. G. (2018). A critical analysis of extraction techniques used for botanicals: Trends, priorities, industrial uses and optimization strategies. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 100, 82—102. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.12.018>.
- Demydova, A., Aksonova, O., Yevlash, V., Tkachenko, O., & Kameneva, N. (2022). Антиоксидантна активність екстрактів з рослин українського походження та їх вплив на окисну стійкість соняшникової олії. *Food Science and Technology*, 16(3), 55—64. <https://doi.org/10.15673/fst.v16i3.2514>.
- Ghosh, M., Upadhyay, R., Mahato, D. K. & Mishra, H. N. (2019). Kinetics of lipid oxidation in omega fatty acids rich blends of sunflower and sesame oils using Rancimat, *Food Chemistry*, 272, 471—477. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.072>.
- Kajszczak, D., Zakłós-Szyda, M. & Podsedek, A. (2020). *Viburnum opulus* L. — A Review of Phytochemistry and Biological Effects. *Nutrients*, 12, 3398. <https://doi.org/10.3390/nu12113398>.
- Meini, M.-R., Cabezudo, I., Boschetti, C. E. & Romanini, D. (2019). Recovery of phenolic antioxidants from Syrah grape pomace through the optimization of an enzymatic extraction process. *Food Chemistry*, 283, 257—264. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.037>.
- Nosenko T., Vovk G., Koroluk T. (2019), Effect of hydrolytic enzymes pretreatment on the oil extraction from pumpkin seeds, *Ukrainian Food Journal*, 8(1), 80—88. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2019-8-1-9>.
- Paşayeva, L., Kararenk, A. C. & Fatullayev, H. (2021). Screening of different fruit extracts from *Viburnum opulus* L. as inhibitors of key enzymes linked to type 2 diabetes and antioxidants: a comparative evaluation. *Food Measure*, 15, 4403—4410. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01007-4>.

Piazza, D. M., Romanini, D. & Meini, M. R. (2023). High-efficiency novel extraction process of target polyphenols using enzymes in hydroalcoholic media. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107, 12205—1216. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12386-7>.

Polka, D., Podsedek, A., & Koziolkiewicz, M. (2019). Comparison of Chemical Composition and Antioxidant Capacity of Fruit, Flower and Bark of *Viburnum opulus*. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(3), 436—442. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00759-1>.

Robles-Ramírez, M., Monterrubio-López, R., Mora-Escobedo, R., & Beltrán-Orozco M. (2016). Evaluation of extracts from potato and tomato wastes as natural antioxidant additives. Взято з <https://www.alanrevista.org/ediciones/2016/1/art-8/>.

Saini A, Panesar P. S., & Bera M. B. (2019). Valorization of fruits and vegetables waste through green extraction of bioactive compounds and their nanoemulsions-based delivery system. *Bioresources and Bioprocessing*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-019-0261-9>.

Shamraja, S. N., Virendra, K. (2019) A co-immobilization of pectinase and cellulase onto magnetic nanoparticles for antioxidant extraction from waste fruit peels. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 470—479. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.12.015>.

Sharma, S., Cheng, S.-F., Bhattacharya, B., & Chakkaravarthi, S. (2019). Efficacy of free and encapsulated natural antioxidants in oxidative stability of edible oil: Special emphasis on nanoemulsion-based encapsulation. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 305—318. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.030>.

Shishir, M. R. I., Xie, L., Sun, C., Zheng, X., & Chen, W. (2018). Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 34—60. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.018>.

Vaiserman, A., Koliada, A., Zayachkivska, A., & Lushchak, O., (2020). Nanodelivery of natural antioxidants: an anti-aging perspective. *Front. Bioeng. Biotechnol*, 7, 447. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00447>.