

УДК 664.8.047.014

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ФОЛАТОВМІСНОЇ КОМБІНОВАНОЇ СИРОВИНИ

Петрова Ж.О.¹, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Коваль І.О.², аспірант¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, koval.igor@olegovich@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0006-5916-6912><https://doi.org/10.31472/tpe.2.2026.3>

У статті досліджено кінетику сушіння фолатовмісної комбінованої сировини, а саме суміші на основі шпинату, кропу, петрушки та суміші на основі стручкової квасолі та зеленої цибулі. Визначено, що для зневоднення фолатовмісної сировини доцільно застосовувати не високі температури сушіння, для збереження якісних характеристик матеріалу.

The article investigates the kinetics of drying folate-containing combined raw materials, namely a mixture based on spinach, dill, parsley, and a mixture based on green beans and green onions. It has been determined that it is advisable to use low drying temperatures for the dehydration of folate-containing raw materials in order to preserve the quality characteristics of the material.

Бібл. 38, рис. 5.

Ключові слова: конвективне сушіння, тепломасообмін, фолати, шпинат, кріп, петрушка, стручкова квасоля, зелена цибуля.

u – вологовміст, кг вол./кг сух.речов.;

τ – час, хв;

V – швидкість теплоносія, м/с;

t – температура теплоносія, °C;

δ – товщина шару, мм;

N – швидкість сушіння, %/хв.

Вступ

Постановка проблеми. З кожним роком у світі при переробці рослинної сировини актуальним є як збереження поживних речовин та енергоресурсів.

Загалом овочі є основним продуктом харчування, оскільки вони багаті на клітковину, мінерали, вітаміни та антиоксиданти [1]. Овочі мають багато переваг для споживача, зокрема вони служать експертами у буферизації кислоти, що утворюється під час травлення [2]. Проведені дослідження показували, що зелені овочі можуть захищати, допомагати запобігати утворенню та знижувати захворюваність на рак раку [3]. При цьому овочі які містять у собі фолати необхідні для нормально-го росту та здоров'я людини протягом усього життєвого циклу [4].

Фолати мають вирішальне значення для життя, як компонент і каталізатор важливих біохімічних реакцій, зокрема, і особливо завдяки своїй центральній ролі в метаболізмі нуклеотидів для синтезу ДНК та процесах метилювання [5, 6].

Фолат – це водорозчинний вітамін групи В, який відіграє життєво важливу роль у рості та розвитку клітин [7, 8]. У своїй природній формі фолат нестабільний при зберіганні та приготуванні їжі [9], при цьому саме

фолієва кислота стабільна [9 - 11] та використовується як добавка та для збагачення продуктів харчування.

Назви фолієвої кислоти або фолату походять від латинського слова *folium*, що означає «лист» [12, 13]. Вперше його було виділено з листя шпинату в 1941 році [13, 14].

Фолієва кислота – це форма фолату, яка природним чином присутня у високих концентраціях у листових овочах, таких як овочі (шпинат, салат, капуста, броколі, спаржа, томати, цибуля-порей, черемша, зелена цибуля), фруктах, бобових (стручкова квасоля, квасоля, горох, сочевиця), горіхах, дріжджах, грибах та тваринних продуктах [15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Шпинат (*Spinacia oleracea* L.) — однорічна листова зелена рослина, яка в основному походить з центральної частини Азії та Ірану [16]. Шпинат (*Spinacia oleracea* L.) належить до ряду гвоздикових (*Caryophyllales*) родини амарантових (*Amaranthaceae*), є низькокалорійним продуктом, багатим на поживні речовини, корисні для організму людини [17]. Листя шпинату багате на бета-каротин (провітамін А), фолієву кислоту (вітаміни А, С), мінеральні речовини (фосфор, натрій і калій) та харчові волокна, воно також визнане цінним

харчовим джерелом антиоксидантів, маючи надзвичайно високу ORAC (здатність поглинати кисневі радикали) [18 - 20].

Стручкова квасоля або зелена квасоля – це молоді, незрілі плоди різних сортів звичайної квасолі (*Phaseolus vulgaris*) [21]. Зелена квасоля відрізняється від багатьох інших сортів квасолі тим, що її збирають та вживають разом зі стручками, що її вкривають, до того, як насіння всередині повністю дозріє [21]. Сира стручкова квасоля на 90% складається з води, 7% вуглеводів, 2% білка і містить незначну кількість жиру. У 100 грамах (3,5 унції) базової кількості сира зелена квасоля містить 31 калорію і є помірним джерелом (діапазон 10-19% добової норми) вітаміну С, вітаміну К, вітаміну В6 і марганцю, а також багатим на фолієву кислоту (вітамін В9) [21, 22].

Шпинат і стручкова квасоля – це рослини, які швидко псується після збору врожаю та споживається лише в сезон вирощування. Їх часто продають консервованими або замороженими.

Сушіння – це один із методів зберігання, який дозволяє продовжити термін споживання рослинної сировини, зберігаючи при цьому вміст вітамінів та запобігаючи росту та виробленню мікроорганізмів, що спричиняють гниття [23 - 25].

При сушінні даної сировини можливо засовувати різні методи, а саме конвективний, сублімаційний, мікрохвильовий, розпилю-вальне та різні комбіновані методи [26 - 28]. Всі наявні методи мають як переваги так і недоліки. При цьому конвективне сушіння також має свої недоліки, на які можна вплинути за допомогою попередньої обробки матеріалу, створення комбінацій та використання комбінованих та ступеневих режимів.

Для стабілізації фолатів рослинну сировину потрібно поєднувати із сировиною, яка має високий вміст вітаміну С [29].

Кріп (*Anethum graveolens* L.) – це листова овочева культура, що походить з південної Європи та західної Азії, і росте як дикоросла рослина в Середземноморському регіоні, де була відома ще стародавнім грекам та римлянам [30]. Зелень кропу містить велику кількість вітаміну С, також вітаміни В, В1, Р, РР, каротин, солі кальцію, калію, заліза, фосфору, нікотину і фолієву кислоту, білки, вуглеводи, рутин, флавоноїди (кверцетин, ізорамнетин, кемпферол), фітонциди і ефірну олію, компонентами якої є карвон, фелландрен і лімонен [31].

Петрушка (*Petroselinum crispum* Mill.) – популярний овоч родини Аріасеае, що походить з південно-західної

Європи та західної Азії. Петрушка – лікарська трава, яка широко використовується в Середземномор'ї понад 2000 років. Наразі її вирощують у всьому світі як кулінарну спецію [32, 33]. Петрушка є джерелом флавоноїдів та антиоксидантів, особливо лютеоліну, апігеніну, фолату, вітаміну К, вітаміну С та вітаміну А [34].

Зелена цибуля – це їстівні овочі різних видів роду *Allium*. Зелена цибуля зазвичай має м'якший смак, ніж більшість видів цибулі. Зелена цибуля має довге, ніжне зелене стебло, біле біля кореня. У неї немає цибулини, і вона має м'який, солодкий цибулевий смак [35]. Зелена цибуля містять білки, вуглеводи, клітковину, пектини, а також вітаміни А, С, Е, вітаміни групи В, каротин. Також багата зелена цибуля на мікроелементи: калій, кальцій, магній, фосфор, залізо [36].

Для стабілізації фолатів до шпинату додаємо кріп та петрушку, а до стручкової квасолі зелену цибулю, які містять у собі велику кількість вітаміну С.

Метою роботи є дослідження кінетики сушіння фолатовмісної комбінованої сировини, а саме суміші на основі шпинату, кропу, петрушки та суміші на основі стручкової квасолі та зеленої цибулі.

Матеріали та методи досліджень

Для досліджень використовували шпинат, кріп, петрушку, стручкову квасолю, зелену цибулю. Перед сушінням стручкову квасолю, шпинат, кріп, петрушку та зелену цибулю відповідно до літературних даних, обов'язково бланшують. Ціль бланшування – збільшити еластичність плодової тканини, інактивувати ферменти, підвищити проникність зовнішніх шарів плоду, видалити повітря із тканин [29].

Виходячи з особливостей фолатовмісної сировини стручкову квасолю бланшували при м'яких режимах при температурі 85 - 90°C на протязі 2 хв. Шпинат, кріп, петрушку та зелену цибулю замочували у воді за температури 20 – 25°C протягом 10 - 15 хвилин. При таких режимах відбуваються мінімальні втрати вітамінів та інших біологічно активних речовин.

Після бланшування до стручкової квасолі додаємо зелену цибулю у співвідношенні 2 : 1 для стабілізації фолатів. Та об'єднуємо шпинат, кріп та петрушку у співвідношенні 1:0,5:0,5 замішуючи та залишаючи на 10-15 хвилин для стабілізації.

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації [37].

Вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини розраховується за формулою, %:

$$W^c = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100,$$

де m_1 – маса порожньої буюкси (з кришкою), г; m_2 – маса буюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 – маса буюкси з наважкою після сушіння, г.

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в кг вол./кг с.р., то отримаємо *вологовміст* (питомий масовміст) матеріалу [35]:

$$u = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}$$

Швидкість сушіння визначається, %/хв:

$$N = \frac{dw}{d\tau} = \frac{du}{d\tau} \cdot 100,$$

де τ – час сушіння, хв.

Результати

Дослідження шпинату, кропу, петрушки та суміші на їх основі проводили за режимом сушіння 55 °С, швидкістю теплоносія 3,0 м/с. Сушіння проводили до вологості матеріалу 7±2%.

На рис. 1 показано зміни вологовмісту та темпе-

ратури в шарі при сушінні шпинату, кропу, петрушки та суміші на їх основі. Як видно з рис. 1 тривалість сушіння у даних овочів знаходиться в межах 180-200хв, при цьому маючи різні вологості.

Як видно з рис. 1 у створеної суміші вологість та тривалість наближається до петрушки, при цьому як вказано вище в співвідношенні більше шпинату.

На рис. 2 представлено зміна швидкості сушіння суміші на основі шпинату, кропу та петрушки в шарі. Як видно з рис. 2 максимальна швидкість для шпинату становить 45,4%/хв, для кропу – 42,8 %/хв, для петрушки – 35,7 %/хв та для суміші – 36,8%/хв.

Дослідження суміші на основі стручкової квасолі та зеленої цибулі проводили за режимами сушіння 60, 70, 80, 100 °С, швидкістю теплоносія 3,0 м/с. Сушіння проводили до вологості матеріалу 8±2%.

Кінетика процесу та швидкість сушіння стручкової квасолі – зеленої цибулі представлена на рис. 3, 4.

Підвищення температури теплоносія значно інтенсифікує процес сушіння фолатовмісної сировини. Так підвищення температури від 60 до 70°С зменшує тривалість сушіння на 21% в суміші спаржевій квасолі – цибулі (рис. 3). Мінімальна тривалість сушіння становить 65 хв за режимом 100 °С, але при цьому псується матеріал.

Максимальна швидкість сушіння при температурі 100°С в суміші стручкова квасоля – цибуля – 32,3%/хв. (рис. 4).

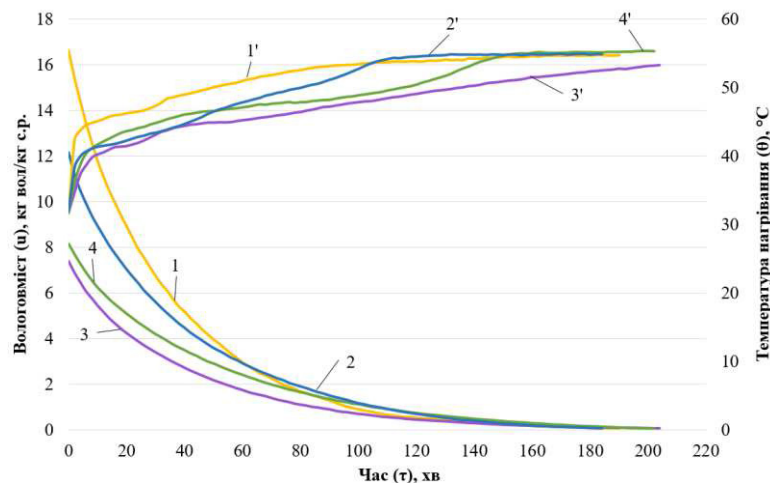


Рис. 1. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4') при сушінні суміші на основі шпинату, кропу та петрушки за режимними параметрами $t=55^{\circ}\text{C}$, $V=3,0$ м/с, $\delta \approx 10$ мм: 1 – шпинат; 2 – кріп; 3 – петрушка; 4 – суміш шпинат/кріп/петрушка

Fig. 1. Change in moisture content (1, 2, 3, 4) and temperature inside the layer (1', 2', 3', 4') during drying of a mixture based on spinach, dill, and parsley under the following operating parameters: $t=55^{\circ}\text{C}$, $V=3.0$ м/с, $\delta \approx 10$ mm: 1 – spinach; 2 – dill; 3 – parsley; 4 – spinach/dill/parsley mixture

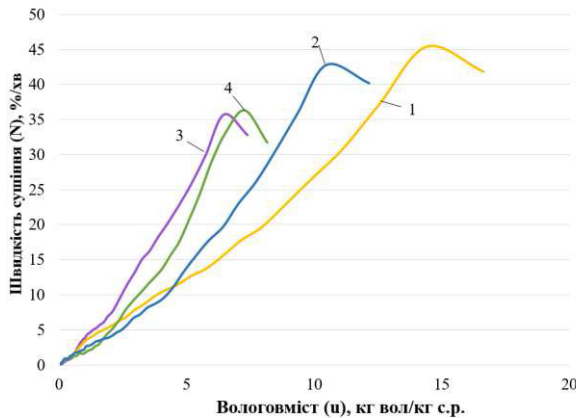


Рис. 2. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) при сушінні суміші на основі шпинату, кропу та петрушки за режимними параметрами $t=55^{\circ}\text{C}$, $V=3,0$ м/с, $\delta \approx 10$ мм: 1 – шпинат; 2 – кріп; 3 – петрушка; 4 – суміш шпинат/кріп/петрушка

Fig. 2. Change in drying rate (1, 2, 3, 4) when drying a mixture based on spinach, dill, and parsley under the following operating parameters: $t=55^{\circ}\text{C}$, $V=3$ m/s, $\delta \approx 10$ mm: 1 – spinach; 2 – dill; 3 – parsley; 4 – spinach/dill/parsley mixture

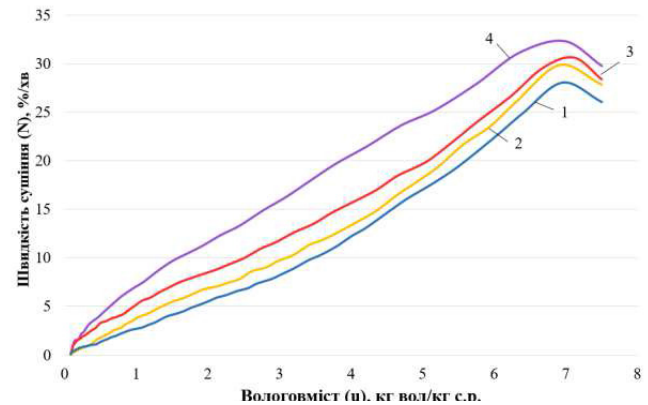


Рис. 4. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) при сушінні суміші на основі стручкової квасолі з зеленою цибулею за режимними параметрами $V=3,0$ м/с, $\delta \approx 10$ мм: 1 – 60°C , 2 – 70°C , 3 – 80°C , 4 – 100°C

Fig. 4. Change in drying rate (1, 2, 3, 4) when drying a mixture based on green beans and green onions under the following operating parameters: $V=3.0$ m/s, $\delta \approx 10$ mm: 1 – 60°C , 2 – 70°C , 3 – 80°C , 4 – 100°C

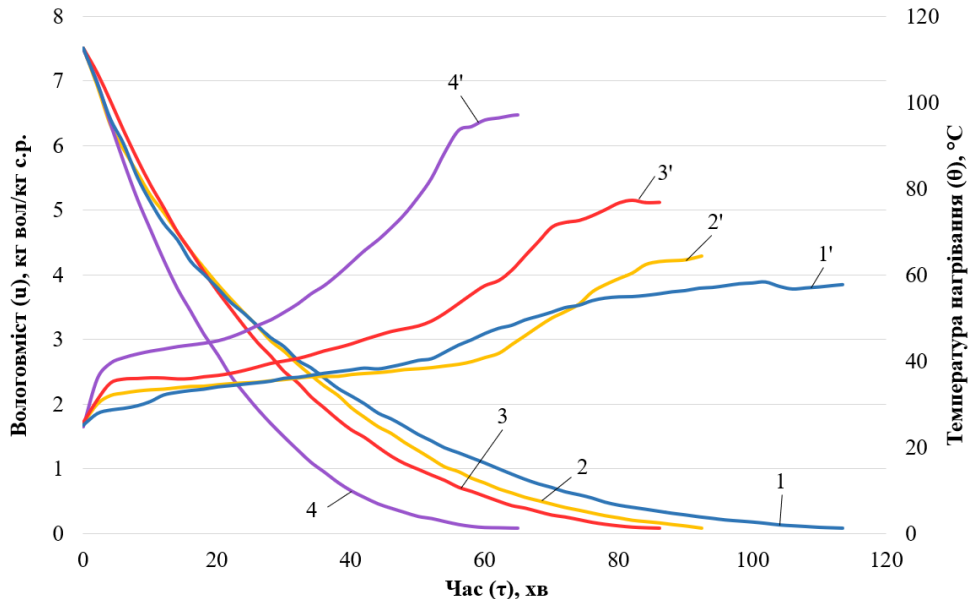


Рис. 3. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4') при сушінні суміші на основі стручкової квасолі з зеленою цибулею за режимними параметрами $V=3,0$ м/с, $\delta \approx 10$ мм: 1 – 60°C , 2 – 70°C , 3 – 80°C , 4 – 100°C

Fig. 3. Change in moisture content (1, 2, 3, 4) and temperature inside the layer (1', 2', 3', 4') during drying of a mixture based on green beans and green onions under the following operating parameters: $V=3.0$ m/s, $\delta \approx 10$ mm: 1 – 60°C , 2 – 70°C , 3 – 80°C , 4 – 100°C

На рис. 5 показаний вміст фолієвої кислоти в залежності від температури теплоносія в фолатовмісній сировині після сушіння. Так підвищення температури теплоносія негативно впливає на фолієву кислоту і в стручковій квасолі втрачається вже при 80°C біля 72%, а подальше збільшення до 100°C призводить до 91% втрат.

Розроблені композиції фолатовмісної сировини та режими сушіння дозволили на 29% зберегти фолати під час переробки.

Для стабілізації фолатів у фолатовмісній сировині була розроблена композиція стручкова квасоля-зелена цибуля.

У висушеній суміші при температурі теплоносія 60°C вміст фолатів становить 71%, з підвищенням температури до 80°C та 100°C цей показник зменшується до 48% та 18% (рис. 5). В порівнянні з моносировиною, у композиції зберігається вміст фолатів навіть при збільшенні температури теплоносія. Проведені дослідження показали, що на стабільність фолатів під час сушіння має вплив температура та складові композиції.

Висновки

У роботі виконані дослідження кінетики сушіння фолатовмісної комбінованої сировини, а саме суміші на основі шпинату, кропу, петрушки та суміші на основі стручкової квасолі та зеленої цибулі.

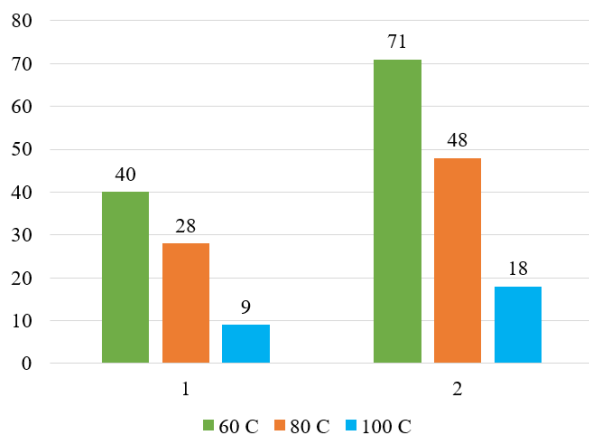


Рис. 5. Збереження фолієвої кислоти від типу фолатовмісної сировини та температури теплоносія: 1 – стручкова квасоля; 2 – стручкова квасоля-зелена цибуля

Fig. 5. Preservation of folic acid depending on the type of folate-containing raw material and heat transfer fluid temperature: 1 – green beans; 2 – green beans and green onions

Визначено, що при сушінні суміші на основі шпинату, кропу та петрушки, тривалість та характер кривих наближаються до результатів отриманих при дослідженні петрушки.

Визначено, що підвищення температури від 60 до 70°C при сушінні суміші на основі стручкової квасолі та зеленої цибулі інтенсифікує процес на 21%. Використання низьких температур теплоносія підтверджується тим, що при сушінні за режимом 60 °C збереження фолатів у 3,9 рази більше за режим 100 °C.

ЛІТЕРАТУРА

1. Nizam N. H. S., Azid A., Khalit S. I., Sidik N. M., Bakar M. F. A. Assessment of heavy metals accumulation in leafy vegetables in Terengganu and Kelantan, Malaysia. *Sarhad Journal of Agriculture*, 2025, 41(4), 1814-1823. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2025/41.4.1814.1823>
2. Latif A., Bilal M., Asghar W., Azeem M., Ahmad M.I., Abbas A., Ahmad M.Z., Shahzad T. Heavy metal accumulation in vegetables and assessment of their potential health risk. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2018, 5(234), 2380-2391.
3. Ağagündüz D., Şahin T. Ö., Yılmaz B., Ekenci K. D., Duyar Özer Ş., Capasso, R. Cruciferous vegetables and their bioactive metabolites: from prevention to novel therapies of colorectal cancer. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, 2022(1), 1534083.
4. Yoo S., Montazeri A., Bennett D., Bo Y., Chen P., Duthie S., Jensen N., Kaminga A., Lai J. S., Li X., MacFarlane A. J., Martinez H., McNulty H., Momoli F., Mossey P., Mullie P., Munger R., Parajuli R. P., Kent M. P., Rubini M., Senekal M., Sikora L., Stintzi A., Theodoratou E., Wang H., Yajnik C., Yaktine A., Little, J. Folate and global health umbrella review series, part 1: methodological framework and syntheses on anaemia and neural tube defects. *Journal of global health*, 2026, 16, 04014. <https://doi.org/10.7189/jogh.16.04014>
5. Menezo Y., Elder K., Clement A., Clement, P. Folic Acid, Folinic Acid, 5 Methyl TetraHydroFolate Supplementation for Mutations That Affect Epigenesis through the Folate and One-Carbon Cycles. *Biomolecules*, 2022, 12(2), 197. <https://doi.org/10.3390/biom12020197>
6. Duthie S. J., Narayanan S., Brand G. M., Pirie L., Grant G. Impact of folate deficiency on DNA stability. *The Journal of nutrition*, 2002, 132(8), 2444S-2449S. <https://doi.org/10.1093/jn/132.8.2444S>

7. Gunnala S., Buhlman L. M., Jadavji N. M. How Increased Dietary Folic Acid Intake Impacts Health Outcomes Through Changes in Inflammation, Angiogenesis, and Neurotoxicity. *Nutrients*, 2025, 17(7), 1286. <https://doi.org/10.3390/nu17071286>
8. Blatch S. A., Stabler S. P., Harrison J. F. The effects of folate intake on DNA and single-carbon pathway metabolism in the fruit fly *Drosophila melanogaster* compared to mammals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2015, 189, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2015.07.007>
9. Eitenmiller R.R., Landen Jr. W.O., Ye L. *Vitamin Analysis for the Health and Food Sciences* (2nd ed.). CRC Press.: Boca Raton, 2007. 664 p. <https://doi.org/10.1201/9781420009750>
10. O'Broin J.D., Temperley I.J., Brown J.P., Scott J.M. Nutritional stability of various naturally occurring monoglutamate derivatives of folic acid. *The American journal of clinical nutrition*, 1975, 28(5), 438-444. <https://doi.org/10.1093/ajcn/28.5.438>
11. Temple C.T., Montgomery J.A. Chemical and Physical Properties of Folic acid and Reduced Derivatives. In: Blackey R.L., Benkovic S.J., Eds., *Folates and Pterins*, Vol. 1, Chemistry and Biochemistry of Folates, 2nd Edition. John Wiley and Sons: New York, 1984. 61-120.
12. Sharma N., Gaikwad A. B., Kulkarni Y. A. Folic Acid in Pain: An Epigenetic Link. In *Nutritional Modulators of Pain in the Aging Population*. Academic Press, 2017. P. 245-251. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805186-3.00021-7>
13. Shulpekova Y., Nechaev V., Kardasheva S., Sedova A., Kurbatova A., Bueverova E., Kopylov A., Malsagova K., Dlamini J. C., Ivashkin V. The Concept of Folic Acid in Health and Disease. *Molecules* (Basel, Switzerland), 2021, 26(12), 3731. doi: 10.3390/molecules26123731
14. Evans W. C., Evans D. Vitamins and hormones. In *Trease and Evans' Pharmacognosy*. Elsevier: London, 2009, P. 451-458. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7020-2933-2.00031-9>
15. Bansal M., Singh N., Pal S., Dev I., Ansari K. M. Chemopreventive role of dietary phytochemicals in colorectal cancer. *Advances in molecular toxicology*, 2018, 12, 69-121. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64199-1.00004-X>
16. Hasnain M. S. U., Zafar A., Rukh M., Khan M. K., Sultani H. M. A., Ashraf M. J. B. The botanical effects of selenium and zinc on biochemical attributes of spinach under varying salt conditions. *The Research of Medical Science Review*, 2025, 3(8), 331-338. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16809962>
17. Balkrishnaa A., Gautama A. K., Sharmaa N., Aryaa V., Khelwadea V. Effects of organic fertilizers on growth, and yield potential of spinach. *Agriculture Extension in Developing Countries (AEDC)*, 2025, 3(2), 109-115. <http://doi.org/10.26480/aedc.02.2025.109.115>
18. Balkrishnaa A., Gautama A. K., Sharmaa N., Aryaa V., Khelwadea V. Effects of organic fertilizers on growth, and yield potential of spinach. *Agriculture Extension in Developing Countries (AEDC)*, 2025, 3(2), 109-115. <http://doi.org/10.26480/aedc.02.2025.109.115>
19. Zhao X., Iwamoto T., Carey E. E. Antioxidant capacity of leafy vegetables as affected by high tunnel environment, fertilisation and growth stage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(14), 2692-2699. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3032>
20. Watanabe M., Ayugase J. Effect of low temperature on flavonoids, oxygen radical absorbance capacity values and major components of winter sweet spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(10), 2095-2104. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6925>
21. *Green bean*
https://en.wikipedia.org/wiki/Green_bean#cite_note-1
22. *Стручкова квасоля*
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%BB%D1%8F
23. Simha P., Gugalia A. Thin layer drying kinetics and modelling of *Spinacia oleracea* leaves. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2013, 8(9), 1053-1066.
24. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Гусарова О.В. Інтенсивні способи сушіння яблучних слайсів з конвективним та комбінованим енергопідведенням. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2024, 46(4), 5-14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1>
25. Inyang U., Oboh I., Etuk B. Drying and the different techniques. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 2017, 8(1), 45-72.
26. Doymaz I. Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 2009, 32(1), 112-125. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00205.x>
27. Karaaslan S. N., Tuncer I. K. Development of a drying model for combined microwave-fan-assisted convection drying of spinach. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(1), 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.12.012>

28. Grace M. H., Hoskin R. T., Hayes M., Iorizzo M., Kay C., Ferruzzi M. G., Lila M. A. Spray-dried and freeze-dried protein-spinach particles; effect of drying technique and protein type on the bioaccessibility of carotenoids, chlorophylls, and phenolics. *Food chemistry*, 2022, 388, 133017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133017>
29. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О. Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини. Київ: Наукова думка, 2018. 187с.
30. Milenković L., Ilić Z. S., Stanojević L., Danilović B., Šunić L., Kevrešan Ž., Stanojević J., Cvetković, D. Chemical Composition and Bioactivity of Dill Seed (*Anethum graveolens* L.) Essential Oil from Plants Grown under Shading. *Plants*, 2024, 13(6), 886. <https://doi.org/10.3390/plants13060886>
31. Kpin
<https://spiceryshop.com.ua/content/enciclopedia/ukrop>
32. Dziki D., Hassoon W. H., Biernacka B., Gawlik-Dziki U. Dried and Powdered Leaves of Parsley as a Functional Additive to Wheat Bread. *Applied Sciences*, 2022, 12(15), 7930. <https://doi.org/10.3390/app12157930>
33. Jadczyk D., Bojko K., Wysocka G., Szymanska M. Yield and biological properties of leaf parsley (*Petroselinum crispum* (Mill.) Nym. Ex AW Hille Convar. *crispum*). *Journal of Elementology*, 2019, 24(2). DOI: 10.5601/jelem.2018.23.4.1697
34. Parsley
<https://en.wikipedia.org/wiki/Parsley>
35. Scallion
<https://en.wikipedia.org/wiki/Scallion>
36. Букет вітамінів у пучку цибулі <https://wz.lviv.ua/health/488676-buket-vitaminiv-u-puchku-tsybuli>
37. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(6), P. 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
38. Ткаченко С. Й., Снівак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 76 с.

STUDY OF THE KINETICS OF DRYING OF FOLATE-CONTAINING COMBINED RAW MATERIALS

Petrova Zh.O.¹, Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), **Koval I.O.²**, PhD student

¹*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, professor, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>*

²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, koval.igor.olegovich@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0006-5916-6912>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2026.3>

Every year, the preservation of nutrients and energy resources becomes increasingly important in the processing of plant raw materials worldwide.

Vegetables are a staple food because they are rich in fibre, minerals, vitamins and antioxidants.

Folate is a water-soluble B vitamin that plays a vital role in cell growth and development. The names folic acid and folate come from the Latin word folium, meaning 'leaf,' and it was first isolated from spinach leaves in 1941.

Folic acid is naturally present in high concentrations in leafy vegetables such as spinach, lettuce, cabbage, broccoli, asparagus, tomatoes, leeks, wild garlic, green onions, fruits, legumes (green beans, beans, peas, lentils), nuts, yeast, mushrooms, and animal products.

Spinach (*Spinacia oleracea* L.) is an annual leafy green plant rich in beta-carotene (provitamin A), folic acid (vitamins A and C), minerals (phosphorus, sodium and potassium) and dietary fibre.

Green beans are young, immature fruits of various varieties of common beans (*Phaseolus vulgaris*). In 100 grams (3.5 ounces) of raw green beans, there are 31 calories and a moderate amount (10-19% of the daily value) of vitamin C, vitamin K, vitamin B6, and manganese, as well as a rich amount of folic acid (vitamin B9).

Vegetables spoil quickly after harvesting and are only consumed during the growing season. They are often sold canned or frozen.

Drying is one of the preservation methods that allows extending the shelf life of plant raw materials while

preserving their vitamin content and preventing the growth and production of microorganisms that cause rotting.

Various methods can be used to dry these raw materials, namely convective, sublimation, microwave, spray drying and various combined methods.

Convective drying is one of the most common methods for processing dark green leafy vegetables.

To stabilise folates, plant raw materials must be combined with raw materials that are high in vitamin C.

The aim of the work is to study the kinetics of drying folate-containing combined raw materials, namely a mixture based on spinach, dill, parsley and a mixture based on green beans and green onions.

The work studies the drying kinetics of folate-containing combined raw materials, namely a mixture based on spinach, dill, parsley, and a mixture based on green beans and green onions.

It was determined that when drying a mixture based on spinach, dill and parsley, the duration and nature of the curves are close to the results obtained in the study of parsley.

It has been determined that increasing the temperature from 60 to 70°C when drying a mixture based on green beans and green onions intensifies the process by 21%. The use of low heat transfer temperatures is confirmed by the fact that when drying at 60°C, folate preservation is 3.9 times higher than at 100°C.

Ref. 38, figure 5.

Keywords: convective drying, infrared radiation, effective drying modes, carotenoids, persimmon.

1. Nizam N. H. S., Azid A., Khalit S. I., Sidik N. M., Bakar M. F. A. Assessment of heavy metals accumulation in leafy vegetables in Terengganu and Kelantan, Malaysia. *Sarhad Journal of Agriculture*, 2025, 41(4), 1814-1823. DOI: 10.17582/journal.sja/2025/41.4.1814.1823

2. Latif A., Bilal M., Asghar W., Azeem M., Ahmad M. I., Abbas A., Ahmad M.Z., Shahzad T. Heavy metal accumulation in vegetables and assessment of their potential health risk. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2018, 5(234), 2380-2391.

3. Ağagündüz D., Şahin T. Ö., Yılmaz B., Ekenci K. D., Duyar Özer Ş., Capasso, R. Cruciferous vegetables and their bioactive metabolites: from prevention to novel therapies of colorectal cancer. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, 2022(1), 1534083.

4. Yoo S., Montazeri A., Bennett D., Bo Y., Chen P., Duthie S., Jensen N., Kaminga A., Lai J. S., Li X., MacFarlane A. J., Martinez H., McNulty H., Momoli F., Mossey P., Mullie P., Munger R., Parajuli R. P., Kent M. P., Rubini M., Senekal M., Sikora L., Stintzi A., Theodoratou E., Wang H., Yajnik C., Yaktine A., Little, J. Folate and global health umbrella review series, part 1: methodological framework and syntheses on anaemia and neural tube defects. *Journal of global health*, 2026, 16, 04014. <https://doi.org/10.7189/jogh.16.04014>
5. Menezo Y., Elder K., Clement A., Clement, P. Folic Acid, Folinic Acid, 5 Methyl TetraHydroFolate Supplementation for Mutations That Affect Epigenesis through the Folate and One-Carbon Cycles. *Biomolecules*, 2022, 12(2), 197. <https://doi.org/10.3390/biom12020197>
6. Duthie S. J., Narayanan S., Brand G. M., Pirie L., Grant G. Impact of folate deficiency on DNA stability. *The Journal of nutrition*, 2002, 132(8), 2444S-2449S. DOI: 10.1093/jn/132.8.2444S
7. Gunnala S., Buhlman L. M., Jadavji N. M. How Increased Dietary Folic Acid Intake Impacts Health Outcomes Through Changes in Inflammation, Angiogenesis, and Neurotoxicity. *Nutrients*, 2025, 17(7), 1286. <https://doi.org/10.3390/nu17071286>
8. Blatch S. A., Stabler S. P., Harrison J. F. The effects of folate intake on DNA and single-carbon pathway metabolism in the fruit fly *Drosophila melanogaster* compared to mammals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2015, 189, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2015.07.007>
9. Eitenmiller R.R., Landen Jr. W.O., Ye L. Vitamin Analysis for the Health and Food Sciences (2nd ed.). CRC Press.: Boca Raton, 2007. 664 p. <https://doi.org/10.1201/9781420009750>
10. O'Broin J. D., Temperley I. J., Brown J. P., Scott J. M. Nutritional stability of various naturally occurring monoglutamate derivatives of folic acid. *The American journal of clinical nutrition*, 1975, 28(5), 438-444. DOI: 10.1093/ajcn/28.5.438
11. Temple C.T., Montgomery J.A. Chemical and Physical Properties of Folic acid and Reduced Derivatives. In: Blackey R.L., Benkovic S.J., Eds., *Folates and Pterins*, Vol. 1, Chemistry and Biochemistry of Folates, 2nd Edition. John Wiley and Sons: New York, 1984. 61-120.
12. Sharma N., Gaikwad A. B., Kulkarni Y. A. Folic Acid in Pain: An Epigenetic Link. In *Nutritional Modulators of Pain in the Aging Population*. Academic Press, 2017. P. 245-251. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805186-3.00021-7>
13. Shulpekova Y., Nechaev V., Kardasheva S., Sedova A., Kurbatova A., Bueverova E., Kopylov A., Malsagova K., Dlamini J. C., Ivashkin V. The Concept of Folic Acid in Health and Disease. *Molecules* (Basel, Switzerland), 2021, 26(12), 3731. doi: 10.3390/molecules26123731
14. Evans W. C., Evans D. Vitamins and hormones. In Trease and Evans' *Pharmacognosy*. Elsevier: London, 2009, P. 451-458. DOI: 10.1016/b978-0-7020-2933-2.00031-9
15. Bansal M., Singh N., Pal S., Dev I., Ansari K. M. Chemopreventive role of dietary phytochemicals in colorectal cancer. *Advances in molecular toxicology*, 2018, 12, 69-121. DOI: 10.1016/B978-0-444-64199-1.00004-X
16. Hasnain M. S. U., Zafar A., Rukh M., Khan M. K., Sultani H. M. A., Ashraf M. J. B. The botanical effects of selenium and zinc on biochemical attributes of spinach under varying salt conditions. *The Research of Medical Science Review*, 2025, 3(8), 331-338. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16809962>
17. Balkrishnaa A., Gautama A. K., Sharmaa N., Aryaa V., Khelwadea V. Effects of organic fertilizers on growth, and yield potential of spinach. *Agriculture Extension in Developing Countries (AEDC)*, 2025, 3(2), 109-115. <http://doi.org/10.26480/aedc.02.2025.109.115>
18. Balkrishnaa A., Gautama A. K., Sharmaa N., Aryaa V., Khelwadea V. Effects of organic fertilizers on growth, and yield potential of spinach. *Agriculture Extension in Developing Countries (AEDC)*, 2025, 3(2), 109-115. <http://doi.org/10.26480/aedc.02.2025.109.115>
19. Zhao X., Iwamoto T., Carey E. E. Antioxidant capacity of leafy vegetables as affected by high tunnel environment, fertilisation and growth stage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(14), 2692-2699. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3032>
20. Watanabe M., Ayugase J. Effect of low temperature on flavonoids, oxygen radical absorbance capacity values and major components of winter sweet spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(10), 2095-2104. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6925>
21. Green bean
https://en.wikipedia.org/wiki/Green_bean#cite_note-1
22. Struchkova kvasolia [Green bean]
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%BB%D1%8F_\(in_Ukr.\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%BB%D1%8F_(in_Ukr.))
23. Simha P., Gugalia A. Thin layer drying kinetics and modelling of *Spinacia oleracea* leaves. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2013, 8(9), 1053-1066.

24. *Snieszkin Yu.F., Paziuk V.M., Husarova O.V.* Intensywni sposoby suszennia yabluchnykh slaisiv z konvektyvnym ta kombinovanim enerhopidvedenniam [Intensive methods of drying apple slices with convective and combined energy supply]. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka*, 2024, 46(4), 5-14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1> (in Ukr.).
25. *Inyang U., Oboh I., Etuk B.* Drying and the different techniques. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 2017, 8(1), 45-72.
26. *Doymaz I.* Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 2009, 32(1), 112-125. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00205.x>
27. *Karaaslan S. N., Tuncer I. K.* Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(1), 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.12.012>
28. *Grace M. H., Hoskin R. T., Hayes M., Iorizzo M., Kay C., Ferruzzi M. G., Lila M. A.* Spray-dried and freeze-dried protein-spinach particles; effect of drying technique and protein type on the bioaccessibility of carotenoids, chlorophylls, and phenolics. *Food chemistry*, 2022, 388, 133017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133017>
29. *Snieszkin Yu.F., Petrova Zh.O.* Enerhoefektyvni teplotekhnolohii pererobky funktsionalnoi syrovyny [Energy-efficient heat technologies for processing functional raw materials]. Kyiv: Naukova dumka, 2018. 187p. (in Ukr.).
30. *Milenković L., Ilić Z. S., Stanojević L., Danilović B., Šunić L., Kevrešan Ž., Stanojević J., Cvetković, D.* Chemical Composition and Bioactivity of Dill Seed (*Anethum graveolens* L.) Essential Oil from Plants Grown under Shading. *Plants*, 2024, 13(6), 886. <https://doi.org/10.3390/plants13060886>
31. *Krip [Dill]* <https://spiceryshop.com.ua/content/enciclopedia/ukrop>
32. *Dziki D., Hassoon W. H., Biernacka B., Gawlik-Dziki U.* Dried and Powdered Leaves of Parsley as a Functional Additive to Wheat Bread. *Applied Sciences*, 2022, 12(15), 7930. <https://doi.org/10.3390/app12157930>
33. *Jadczak D., Bojko K., Wysocka G., Szymanska M.* Yield and biological properties of leaf parsley (*Petroselinum crispum* (Mill.) Nym. Ex AW Hillc Convar. crispum). *Journal of Elementology*, 2019, 24(2). DOI: 10.5601/jelem.2018.23.4.1697
34. *Parsley* <https://en.wikipedia.org/wiki/Parsley>
35. *Scallion* <https://en.wikipedia.org/wiki/Scallion>
36. *Buket vitaminiv u puchku tsybuli* [A bouquet of vitamins in a bunch of onions] <https://wz.lviv.ua/health/488676-buket-vitaminiv-u-puchku-tsybuli>
37. *Petrova Z., Snieszkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A.* Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(6), P. 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
38. *Tkachenko S. Y., Spivak O. Yu.* Sushylni protsesy ta ustanovky. Navchalnyi posibnyk [Drying processes and installations. Study guide]. Vinnytsia: VNTU, 2007. 76 s. (in Ukr.).

Отримано 24.02.2026

Received 24.02.2026

Прийнято до друку 04.05.2026
Accepted for publication 04.05.2026

Дата публікації 30.06.2026
Publication date 30.06.2026