

섹션 14.

AUTOMATION AND APPLIANCES MAKING

DOI 10.36074/logos-13.03.2026.024

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ НА БАЗІ ESP З ОНЛАЙН-ОЦІНКОЮ ПАРАМЕТРА ШВИДКОСТІ ДЕГІДРАТАЦІЇ ТА СЕРВЕРНИМ МОНІТОРИНГОМ

Смолій Олександр Васильович¹, Микитишин Андрій Григорович²,
Короліук Ростислав Ігорович³

1. здобувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА

ORCID ID: 0009-0008-3295-0162

2. канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА

ORCID ID: 0000-0002-2999-3232

3. старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА

ORCID ID: 0000-0002-7700-3774

Сушіння харчових продуктів є складним тепломасообмінним процесом, динаміка якого визначається температурою сушильного агента, відносною вологістю повітря, швидкістю потоку та геометрією продукту [1, 5]. У більшості промислових систем керування здійснюється за температурою або тривалістю процесу, що не враховує реальну кінетику дегідратації продукту [8].

Інтегральним показником вмісту вологи є маса продукту. Зміна маси в часі дозволяє оцінити ефективну швидкість дегідратації та динаміку процесу.

Метою роботи є розробка системи керування процесом сушіння на базі мікроконтролера ESP, яка забезпечує:

- вимірювання маси в реальному часі,
- онлайн-оцінку параметра швидкості дегідратації,
- формування керувального впливу,
- передачу даних на сервер для моніторингу.

Запропонований підхід відповідає сучасним тенденціям інтелектуалізації сушильного обладнання та інтеграції IoT-технологій у харчовій промисловості [2, 7].

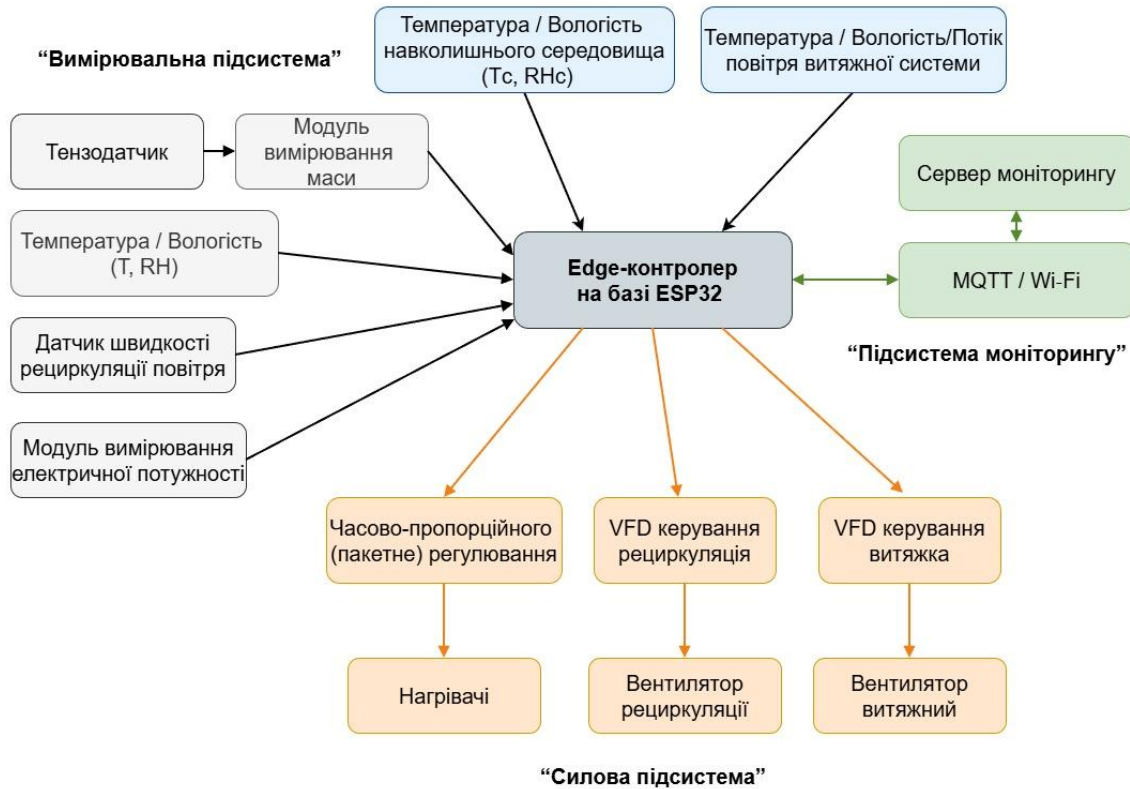


Рис. 1. Структурна схема системи керування процесом сушіння з онлайн-оцінкою параметра швидкості дегідратації та серверним моніторингом

Структурна схема системи (рис. 1) відображає архітектуру кіберфізичної системи керування процесом сушіння, що складається з вимірювальної, керуючої, силової та моніторингової підсистем. Вимірювальна підсистема включає модуль визначення маси продукту на основі тензометричного давача, давачі температури та відносної вологості сушильної камери і навколишнього середовища, давач швидкості рециркуляції повітря, а також модуль вимірювання електричної потужності. Зібрані дані надходять до edge-рівня керування, реалізованого на базі мікроконтролера ESP32, де здійснюється обробка вимірювань, оцінювання параметра швидкості дегідратації $k(t)$ у реальному часі та формування керуючих впливів.

Силова підсистема включає часово-пропорційне (пакетне) регулювання потужності нагрівачів та керування вентиляторами рециркуляції і витяжки за допомогою частотних перетворювачів (VFD), що забезпечує регулювання теплового та масообмінного режимів сушіння. Підсистема моніторингу реалізує двосторонній обмін даними між edge-контролером та сервером через MQTT / Wi-Fi інтерфейс, що дозволяє здійснювати віддалений контроль

섹션 14.

AUTOMATION AND APPLIANCES MAKING

параметрів процесу, зберігання історичних даних та корекцію режимів роботи.

Потік даних у системі включає такі основні етапи:

1. Зчитування сигналів із вимірювальних датчиків, зокрема маси продукту, температури та відносної вологості повітря, швидкості рециркуляції та електричної потужності.

2. Попередню обробку та фільтрацію сигналів з метою зменшення впливу шуму та випадкових коливань.

3. Обчислення параметра швидкості дегідратації $k(t)$ на основі логарифмічної моделі сушіння.

4. Формування керуючих впливів для нагрівачів та вентиляторів відповідно до поточного стану процесу.

5. Передачу телеметричних даних на сервер моніторингу через MQTT-інтерфейс.

Незважаючи на те, що параметри, отримані від датчиків, є об'єктивними фізичними величинами, їх інтерпретація потребує врахування фізичних закономірностей тепло- та масообміну. Розуміння механізмів дегідратації пелет є необхідним не лише для забезпечення стабільного регулювання процесу, але й для коректного аналізу експериментальних результатів та оцінювання ефективності режимів сушіння.

Математична модель процесу сушіння. Для опису процесу дегідратації використано логарифмічну модель (1):

$$m(t) = M_e + (M_0 - M_e)e^{-kt} \quad (1)$$

де:

$m(t)$ — маса продукту в момент часу t ;

M_0 — початкова маса;

M_e — рівноважна маса;

k — ефективний параметр швидкості дегідратації на кожному етапі.

Логарифмічна модель кінетики сушіння широко використовується для опису тонкошарових процесів дегідратації та визначення ефективного параметра швидкості k [3, 4].

Оцінювання параметра швидкості дегідратації в реальному часі дозволяє адаптувати режим сушіння відповідно до фактичної кінетики процесу [4].

Параметр k залежить від температури, вологості та гідродинамічних умов і не є сталим протягом процесу.

Онлайн-оцінка параметра швидкості дегідратації. На кожному часовому сегменті параметр k визначається шляхом апроксимації експериментальної кривої сушіння логарифмічною моделлю.

Для спрощеного покрокового оцінювання використовується співвідношення (2), отримане з аналітичного розв'язку моделі:

$$k_i = \frac{-1}{\Delta t} \ln \left(\frac{m_i - M_e}{m_{i-1} - M_e} \right) \quad (2)$$

Для зменшення впливу шуму вимірювань оцінювання параметра k виконується на часових сегментах з використанням ковзного усереднення сигналу маси. Розрахований параметр k дозволяє:

- оцінювати інтенсивність сушіння;
- виявляти зміну режимів процесу;
- використовувати його як критерій для корекції температури.

Контрольний тест (валідація алгоритму). Для перевірки коректності покрокового прогнозування маси було виконано тест на експериментальних даних за умов наближено сталого температурного режиму $T \approx 80^\circ\text{C}$. Експериментальні дослідження проведено на лабораторній сушильній установці з рециркуляцією повітря. Очікуваний час сушіння було розділено на 10 рівних інтервалів. Для першого інтервалу приймалось початкове значення $k = 0,6$, $M_e = 0,2$, а для кожного наступного - використовувалось значення k , отримане на попередньому інтервалі. За результатами тесту значення k залишалось практично сталим у межах 0.600–0.606, а відносна похибка прогнозу кінцевої маси наступного інтервалу не перевищувала $\sim 0.3\%$, що підтверджує узгодженість моделі та коректність реалізації алгоритму в умовах стаціонарного режиму сушіння. Крива сушіння показана на рисунку 2. Покроковий розрахунок коефіцієнта k що відповідає цій кривій на рисунку 3.

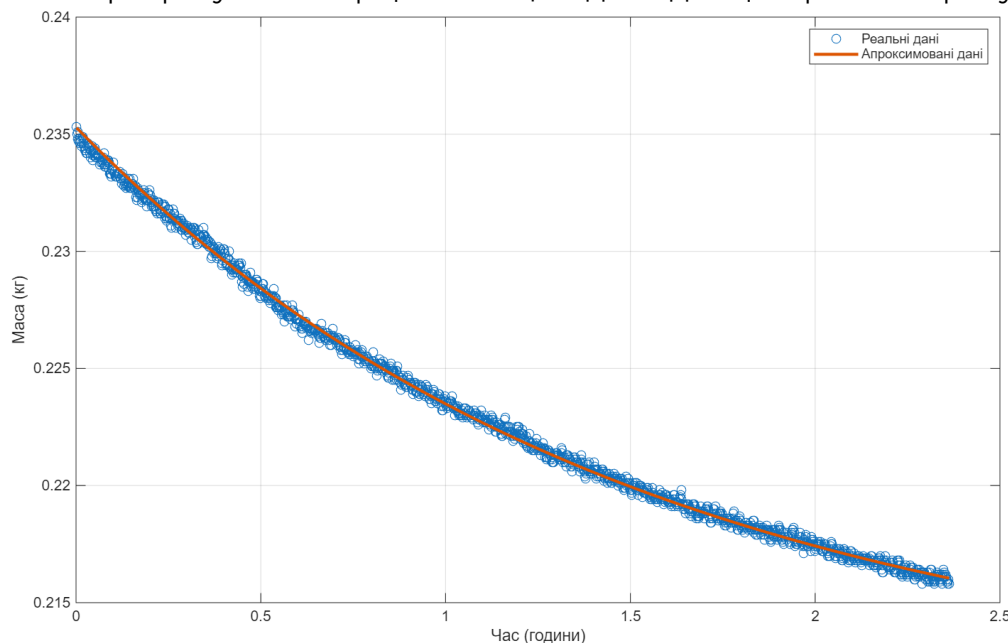


Рис. 2. Крива сушіння

섹션 14.

AUTOMATION AND APPLIANCES MAKING

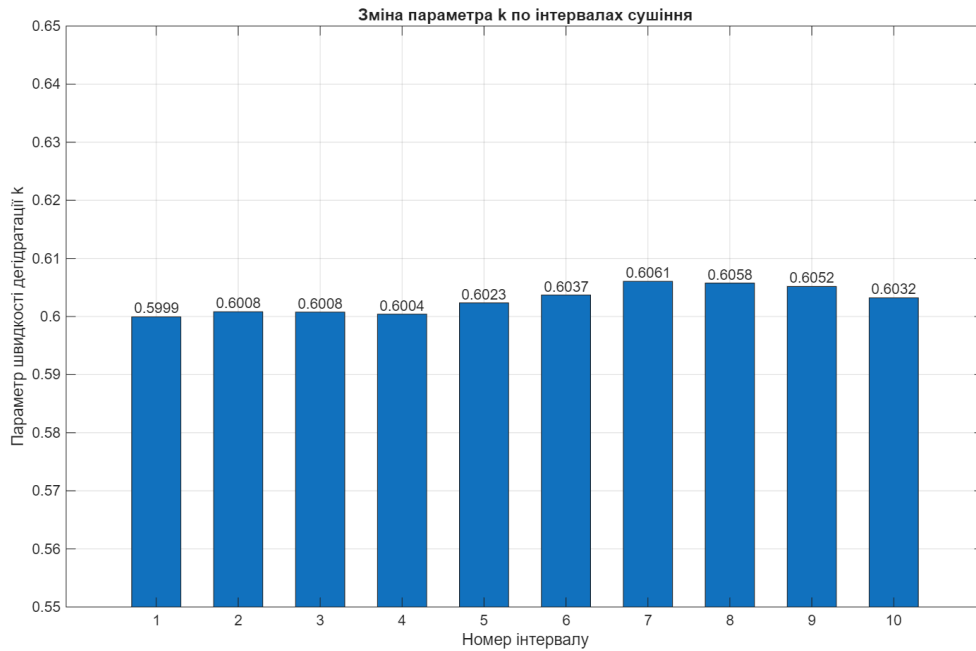


Рис. 3. Покроковий прогноз параметра k по інтервалах сушіння

Таблиця 1

Результати адаптивного покрокового прогнозування маси при T = 80 °C

№ інтервалу	k, використане	k, оцінене	Me, оцінене	Похибка прогнозу, %
1	0.60000	0.59994	0.20599	-0.27
2	0.59994	0.60082	0.20701	-0.20
3	0.60082	0.60076	0.20761	-0.13
4	0.60076	0.60041	0.20787	-0.20
5	0.60041	0.60234	0.20957	0.01
6	0.60234	0.60370	0.21008	0.01
7	0.60370	0.60606	0.21000	0.05
8	0.60606	0.60576	0.20906	-0.01
9	0.60576	0.60517	0.21127	0.17
10	0.60517	0.60322	0.21264	—

[авторська розробка]

Алгоритм керування (рис. 4). Керування здійснюється шляхом підтримання параметра швидкості дегідратації кожного етапу у заданих межах (3). Такий підхід вимагає попереднього розрахунку або лабораторного вимірювання k для заданого продукту[6] з наступною корекцією згідно реальної кривої сушіння.

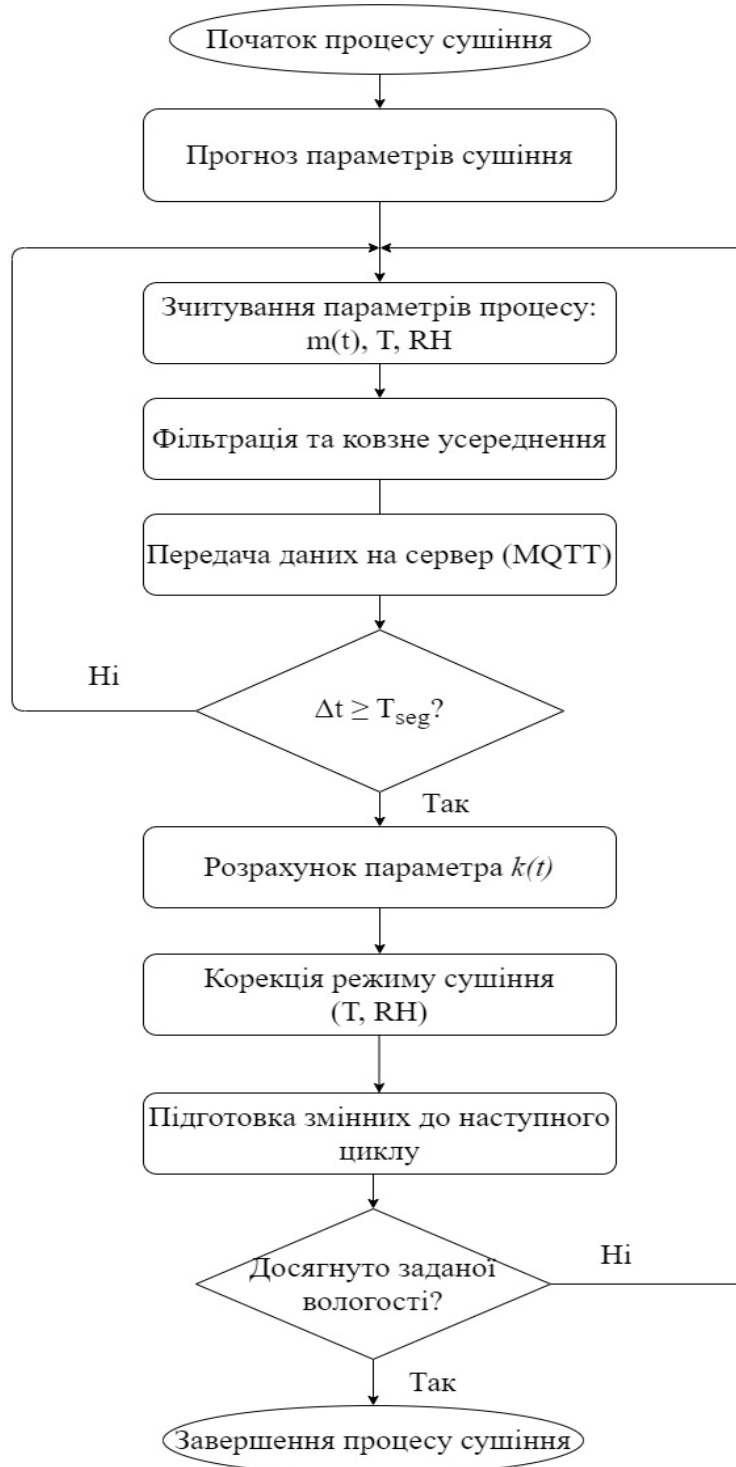


Рис. 4. Алгоритм адаптивного керування процесом сушіння з онлайн-оцінкою параметра $k(t)$



섹션 14.

AUTOMATION AND APPLIANCES MAKING

$$k_{\min} \leq k(t) \leq k_{\max} \quad (3)$$

Керувальний сигнал формується за правилом (4):

$$u(t) = \begin{cases} u(t - \Delta t) + \Delta u, & k(t) < k_{\min} \\ u(t - \Delta t) - \Delta u, & k(t) > k_{\max} \\ u(t - \Delta t), & \text{інакше} \end{cases} \quad (4)$$

де $u(t)$ — потужність нагріву.

Такий підхід дозволяє враховувати динаміку процесу, а не лише статичні параметри температури.

Серверний моніторинг. Передача телеметрії реалізована з використанням MQTT-протоколу, що широко застосовується у системах IoT-моніторингу та керування технологічними процесами [2]. Реалізація edge-архітектури дозволяє зменшити навантаження на центральний сервер та забезпечити автономність системи [7].

Серверна частина забезпечує:

- приймання телеметрії;
- зберігання у базі даних;
- візуалізацію параметрів $m(t)$, $T(t)$, $RH(t)$, $k(t)$;
- аналіз архівних даних.

Система моніторингу дозволяє віддалено контролювати процес сушіння та оцінювати ефективність алгоритму (рис. 5).

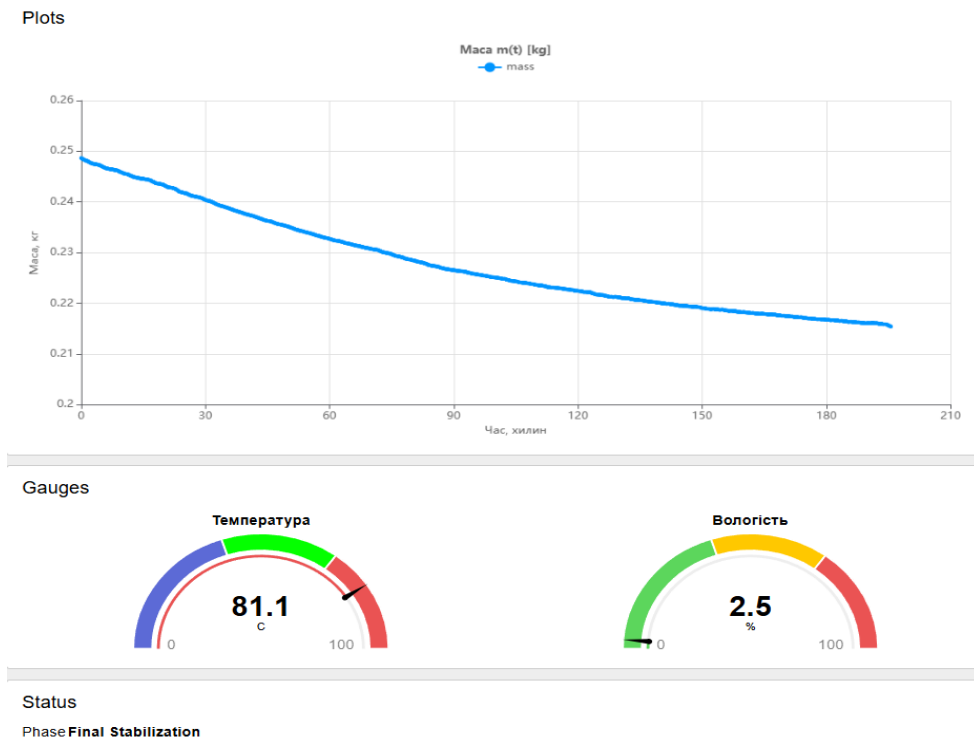


Рис. 5. Серверний моніторинг

Висновки:

1. Розроблено систему керування процесом сушіння на базі мікроконтролера ESP
2. Запропоновано метод онлайн-оцінки параметра швидкості дегідратації $k(t)$.
3. Реалізовано серверний моніторинг процесу сушіння на основі MQTT.
4. Експериментальні результати підтвердили коректність запропонованого алгоритму адаптивного керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Asrate, D. A., & Ali, A. N. (2025). Review on the recent trends of food dryer technologies and optimization methods of drying parameters. *Applied Food Research*, 5(1), Article 100927. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100927>
- [2] Choosumrong, S., Hataitara, R., Panumonwatee, G., Raghavan, V., Nualsri, C., Phasinam, T., & Phasinam, K. (2023). Development of IoT-based smart monitor and control system using MQTT protocol and Node-RED for parabolic greenhouse solar drying. *International Journal of Information Technology*, 15(4), 2089–2098. <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01237-3>
- [3] Filipović, V. S., Janković, B., & Petrović, M. (2022). Modelling convective thin-layer drying of carrot slices and quality parameters. *Thermal Science*, 26(3A), 2187–2198. <https://doi.org/10.2298/TSCI210422285F>
- [4] Mansour, N. E., Villagran, E., Rodriguez, J., Akrami, M., Flores-Velazquez, J., Metwally, K. A., Alhumedi, M., Ahmed, A. F., & Elshawadfy Elwakeel, A. (2025). Effect of Drying Conditions on Kinetics, Modeling, and Thermodynamic Behavior of Marjoram Leaves in an IoT-Controlled Vacuum Dryer. *Sustainability*, 17(13), 5980. <https://doi.org/10.3390/su17135980>
- [5] Nowacka, M. (2023). Drying technologies in food processing. *Applied Sciences*, 13(19), Article 10597. <https://doi.org/10.3390/app131910597>
- [6] Smolii, O., & Mykytyshyn, A. (2025). Automated system for monitoring pellet drying for snack production. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 347(1), 612–619. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-85>
- [7] Verde Romero, D. A., Villalvazo Laureano, E., Jiménez Betancourt, R. O., & Navarro Álvarez, E. (2024). An open-source IoT edge-computing system for monitoring energy consumption in buildings. *Results in Engineering*, 101875. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101875>
- [8] Yu, P. (2025). Current status of grain drying technology and equipment. *Foods*, 14(14), Article 2426. <https://doi.org/10.3390/foods14142426>

