

Inovativne tehnologije sušenja zrna žitarica

Sadržaj

Učinkovito sušenje zrna žitarica nakon žetve, zbog povišene vlage u zrnu ključno je za očuvanje kvalitete u procesu transporta i skladištenja. Tradicionalne metode sušenja temelje se na kontroliranom protoku zagrijanog zraka, osiguravajući ravnomjerno sušenje i smanjenje vlage, dok su inovativne tehnologije sušenja razvijene osim navedenog radi poboljšanja učinkovitosti i energetske efikasnosti cjelokupnog procesa. Postoje razne vrste inovativnog sušenja, a u ovome radu opisane su najznačajnije (mikrovalne tehnologije, infracrvene tehnologije i sušenje u fluidiziranom sloju te radiofrekvencijsko sušenje). Mikrovalne tehnologije sušenja kombinirane sa zagrijanim zrakom omogućuju brzo i energetski učinkovito sušenje. Primjenom infracrvenog sušenja skraćuje se vrijeme sušenja i poboljšava kvaliteta osušenog zrna. Sušenje u fluidiziranom sloju omogućuje ravnomjerno sušenje velikih količina zrna u kraćem vremenskom periodu, dok se radiofrekvencijskim sušenjem omogućava brza, jednolika i učinkovita dorada zrna. Kombinirane tehnologije sušenja omogućuju postizanje optimalnih uvjeta procesa sušenja. Ovaj rad analizira efikasnost, prednosti i izazove u primjeni različitih tehnologija sušenja, te pruža komparativnu analizu. Cilj je pružiti sveobuhvatan uvid koji će olakšati razumijevanje i implementaciju navedenih tehnologija te pokazati kako razvijene tehnologije sušenja mogu značajno doprinijeti poljoprivrednoj proizvodnji osiguravajući tako sigurnost i kvalitetu žitarica tijekom skladištenja i distribucije.

Ključne riječi: sušenje, inovativne tehnologije, energetska učinkovitost, žitarice

Uvod

Žitarice predstavljaju jedan od najvažnijih poljoprivrednih proizvoda i smatraju se primarnim izvorom hrane (slika 1). Obzirom na rastuću svjetsku populaciju postoji sve veća potreba za razvojem naprednih tehnologija dorade žitarica. Sušenje predstavlja najčešći način dorade žitarica, što omogućuje očuvanje i olakšanu distribuciju sirovine (Raghavan i Sosle, 2014, Krička i sur., 2017., Matin i sur., 2024). Sušenje žitarica nakon žetve smanjuje aktivnost vode u zrnu, što je ključno za očuvanje kvalitete. Prednosti sušenja uključuju smanjenje aktivnosti vode, omogućavanje dugotrajnog skladištenja, te smanjenje ili sprječavanje razvoja mikroorganizama (Krička i sur., 2019, Matin i sur., 2022). Također, sušenjem se smanjuje rizik od pojave mikotoksina, a smanjenje volumena i mase olakšava transport (Ziegler i sur., 2023). Postoji sušenje u elementarnom (tankom??), debelom stacionarnom te u protočnom sloju. Sušenje tankog sloja jedna je od osnovnih metoda gdje je zrno izloženo suhom zraku pri približno konstantnoj temperaturi i vlažnosti zrna. Ova metoda omogućuje jednoliko sušenje zrna što je ključno za održavanje njegove kvalitete i smanjenje rizika od kvarenja

¹ Ivan Brandić, mag. ing. agr, prof. dr. sc. **Tajana Krička**, izv. prof. dr. sc. **Ana Matin**, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Svetošimunska cesta 25, 10000 Zagreb, Hrvatska
Autor za korespondenciju: amatin@agr.hr

(Hemis i sur., 2009). Sušenje dubokog sloja omogućava doradu velike količine zrna te dolazi do ravnomjerne distribucije vlage i povećava učinkovitost sušenja (Ranjbaran i sur., 2014).



Slika 1. Neke žitarice /

Picture 1. Some cereals

Sa aspekta protoka zraka u praksi se najviše koriste konvekcijsko i kondukcijsko sušenje. Najčešći način sušenja je kontinuirano sušenje konvekcijskim načinom prolaza zraka. Kontinuirane sušare mogu biti velikog kapaciteta i omogućuju sušenje velikih količina zrna. U procesu sušenja radni medij (zrak) ima dvije funkcije, prenosi toplinu od izvora topline i predaje je zrnu kojega suši te istovremeno prima vodu koja je ovom toplinom isparena iz zrna i prenosi je u atmosferu (Brandić i sur., 2024). Zrak koji se koristi kao medij za sušenje je vlažni zrak, odnosno smjesa različitih plinova (najviše dušika (N) i kisika (O)) i vodene pare. Količina vodene pare u zraku promjenjiva je i kreće se od 0 do 4 volumna postotka, a može se izraziti kao parcijalni tlak vodene pare u ukupnoj smjesi vlažnog zraka (Krička i sur. 2001). U doradi zrna kukuruza koristi se i kondukcijsko sušenje npr. tostiranje koje se pokazalo kao optimalan termički postupak dorade soje, dok se rjeđe primjenjuje kod ostalih ratarskih proizvoda, ali omogućuje brže sušenje i značajniju energetska učinkovitost (Matin i sur, 2013). U novije vrijeme se primjenjuju sve više inovativne tehnologije sušenja koje su značajno unaprijedile učinkovitost procesa sušenja, smanjile potrošnju energije i očuvale nutritivna svojstva zrna. Najvažnije su mikrovalno, infracrveno i sušenje u fluidiziranom sloju te radiofrekventno sušenje. Kombinacija različitih metoda sušenja pokazala se izuzetno učinkovitom u postizanju optimalnih rezultata radi mogućnosti precizne kontrole nad procesom sušenja, smanjujući rizik od prekomjernog sušenja ili nedovoljno osušenih zrna, što je ključno za očuvanje kvalitete i sigurnosti zrna žitarica.

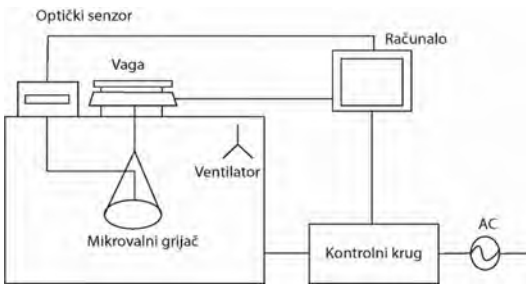
S obzirom na sve navedeno, ovaj rad će se fokusirati na opis važnijih inovativnih tehnologija sušenja zrna, uključujući njihovu efikasnost, prednosti i izazove u primjeni. Kroz komparativnu analizu s tradicionalnim metodama, istražiti će se kako ove napredne tehnologije mogu doprinijeti poboljšanju kvalitete zrna i smanjenju ekološkog otiska. Cilj je pružiti sveobuhvatan uvid koji će olakšati razumijevanje i implementaciju ovih tehnologija u praksi te ukazati na potencijalne smjerove budućih istraživanja.

Primjena mikrovalnih tehnologija sušenja

Mikrovalno sušenje zrna žitarica koristi mikrovalnu energiju za uklanjanje vlage iz zrna, a ima nekoliko ključnih prednosti. Prvo, značajno skraćuje vrijeme sušenja u usporedbi s konvencionalnim metodama, što omogućava očuvanje kvalitete zrna i smanjenje gubitaka, kao i potrošnja energije (Guo i sur., 2017). Energija mikrovalova prodire duboko u zrno, što rezultira ravnomjernijim sušenjem cijele mase zrna žitarica i smanjuje rizik od pregrijavanja i oštećenja (Chandrasekaran i sur., 2013). Također, ova metoda je energetska učinkovitija jer izravno zagrijava vodu unutar zrna žitarica, smanjujući pritom gubitke energije.

Brže sušenje pri nižim temperaturama pomaže očuvanju nutritivnih svojstava. Međutim, mikrovalno sušenje ima i određena ograničenja. Inicijalni troškovi za opremu mogu biti visoki, što može predstavljati prepreku za proizvođače. Proces zahtjeva preciznu kontrolu kako bi se izbjeglo pregrijavanje i potencijalno oštećenje sušenog materijala, a prilagodba za velike proizvodne kapacitete može biti izazovna (Karimi, 2010).

Tako su Liu i sur., (2021) analizirali karakteristike sušenja zrna kukuruza pomoću mikrovalova pri različitim uvjetima sušenja. Koristili su različite snage mikrovalova (70 W i 280 W) i različite količine uzoraka (60, 100 i 200 g). Rezultati su pokazali da veća snaga mikrovalova rezultira bržim sušenjem i višim brzinama sušenja, dok veće opterećenje usporava proces. Prosječne brzine sušenja zrna kukuruza pri 70 W i 280 W bile su $1.51 \times 10^{-2} \text{ g/g}\cdot\text{min}^{-1}$ i $4.74 \times 10^{-2} \text{ g/g}\cdot\text{min}^{-1}$. Mikrovalno sušenje pokazalo je značajne energetske uštede u usporedbi s elektrotermičkim sušenjem, s potrošnjom energije od 0.468 MJ pri 70 W i 0.608 MJ pri 280 W. Kvaliteta sušenog kukuruza, ocijenjena prema stupnju pucanja i sadržaju škroba, bila je viša pri nižim temperaturama elektrotermičkog sušenja (60 °C i 80 °C) te pri mikrovalnom sušenju od 70 W. Stupnjevi pucanja bili su 21.98%, 27.31% i 31.27%, a sadržaj škroba 71.16%, 68.43% i 61.32% što su vrlo dobre vrijednosti s kvalitativnog gledišta. Međutim, za očuvanje kvalitete, intenzitet mikrovalnog sušenja ne bi trebao prelaziti 0.7 W/g (slika 2).



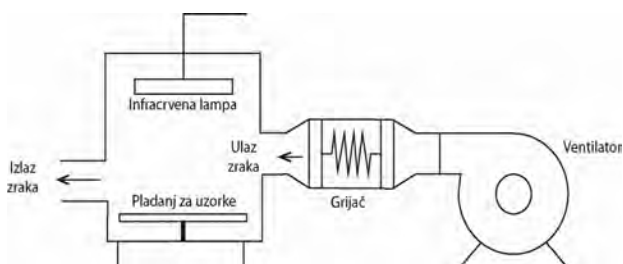
Slika 2. Shematski prikaz sušenja pomoću mikrovalnih tehnologija (Nair i sur., 2011) / **Figure 2.** Schematic representation of drying using microwave technologies (Nair et al., 2011)

Primjena infracrvenih tehnologija sušenja

Sušenje zrna žitarica infracrvenim zračenjem predstavlja efikasan postupak u doradi zrna. Infracrveno zračenje koristi elektromagnetske valove za prijenos topline neposredno na površinu zrna, što omogućuje brže i ravnomjernije sušenje. Prednosti ove metode su skraćeno vrijeme sušenja, smanjena potrošnja energije i poboljšana kvaliteta konačnog proizvoda. Navedena metoda osigurava visoki stupanj kontrole na procesnim parametrima, čime se postižu željene vrijednosti karakteristika zrna. Proces također omogućuje očuvanje nutritivnih vrijednosti i organoleptičkih svojstava žitarica, smanjujući rizik od oštećenja izazvanog sušenjem. Infracrveno sušenje može se kombinirati s drugim metodama kako bi se dodatno poboljšala učinkovitost procesa (Sakare i sur., 2020).

Tako su (Tuncel i sur., 2010) proveli su istraživanje kako bi analizirali utjecaj infracrvenog (IR) i sušenja vrućim zrakom (HA) na svojstva kukuruza, s ciljem pronalaženja energetski učinkovite metode sušenja. Istraživanja su provedena na zrnu kukuruza različitog početnog sadržaja vlage (24%, 16%, 15%), pri čemu su korištene IR, HA i kombinirane IR-HA tehnike sušenja. Rezultati su pokazali da IR i IR-HA značajno smanjuju vrijeme sušenja u odnosu na samo HA sušenje, pri čemu su IR-HA kombinirane metode smanjile vrijeme sušenja za do 70%. Specifična potrošnja energije (SEC) bila je niža za IR i IR-HA metode u usporedbi s HA metodom, pri čemu je IR sušenje potrošilo 12% do 40% manje energije za isparavanje vode iz zrna.

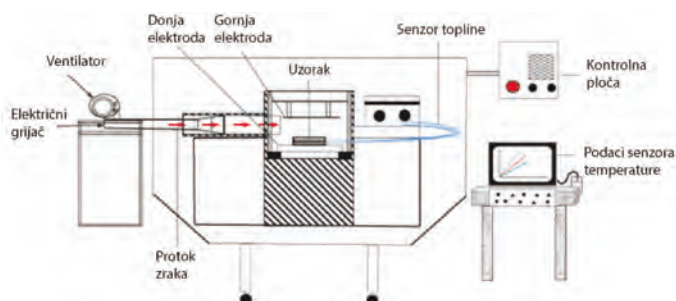
S obzirom na sadržaj fenolnih kiselina, karotenoida i sirovih proteina, nije bilo značajnih razlika između kontrolnih i sušenih uzoraka, što ukazuje na očuvanje nutritivnih svojstava kukuruza. Ove metode sušenja također su pokazale povoljne rezultate u očuvanju boje kukuruza. IR sušenje se pokazalo kao obećavajuća alternativa za sušenje kukuruza s početnim sadržajem vlage iznad 16%, pružajući brže i energetske učinkovitije rezultate u usporedbi s tradicionalnim metodama sušenja vrućim zrakom (slika 3).



Slika 3. Shematski prikaz konvekcijskog sušenja potpomognuto infracrvenom tehnologijom (Sakare i sur., 2020) / **Figure 3.** Schematic representation of convection drying assisted by infrared technology (Sakare et al., 2020)

Primjena radiofrekvencijskih tehnologija sušenja

Radiofrekvencijsko sušenje predstavlja tehnologiju sušenja koja nudi mogućnost brzog, jednolikog i energetski učinkovitog sušenja (Dev i Raghavan., 2014). Prednost ovakvog načina sušenja je značajno smanjenje vremena sušenja i potrošnje energije u usporedbi sa tradicionalnim metodama poput sušenja vrućim zrakom (Mahmood i sur., 2022). Primjena radiofrekvencijskog sušenja kod ratarskih proizvoda pokazala je poboljšane stupnjeve sušenja, smanjene omjera pukotina i očuvanu kvalitetu, što ga čini održivom alternativom za industrijske operacije sušenja žitarica (Volgin i sur., 2022). Također, upotreba višestupanjskih pristupa radiofrekvencijskom sušenju može dodatno optimizirati proces rješavanjem problema, kao što su nejednolika raspodjela vlage i produljenja vremena sušenja, osiguravajući bolju kvalitetu i učinkovitost proizvoda (Mao i Wang., 2023). Općenito, radiofrekvencijsko sušenje predstavlja obećavajuće rješenje za poboljšanje učinkovitosti i kvalitete procesa sušenja žitarica, s potencijalom za daljnji napredak i industrijsku primjenu. Tako su Xie i sur., (2020) istražili primjenu kombiniranih tehnologija sušenja radiofrekvencijskim (RF) tehnologijama i vrućim zrakom na zrnu sjemenskog kukuruza, pri čemu su istraživali karakteristike sušenja pri različitim razmacima RF elektroda (140, 150 i 160 mm). Pomoću RF značajno je povećana brzina sušenja sjemena kukuruza, a trajanje sušenja smanjeno je do 70% u usporedbi s HAD (eng. hot air drying). RF-HAD uzorci pokazali su višu aktivnost dehidrogenaze (DHA), ali niži postotak klijavosti (GP) u odnosu na HAD uzorke. Sušenje kukuruza metodom RF-HAD također je pridonijelo promicanju dormantnosti sjemena (slika 4).



Slika 4. Shematski prikaz radiofrekvencijskog sušenja (Mahmood i sur., 2022) / **Figure 4.** Schematic representation of radiofrequency drying (Mahmood et al., 2022)

Zaključak

Učinkovito sušenje žitarica ključan je korak u poslijezetvenoj doradi ratarskih proizvoda koja osigurava očuvanje kvalitete tijekom skladištenja i transporta. Tradicionalne metode sušenja, temelje se na kontroliranom protoku zagrijanog zraka, osiguravajući tako ravnomjerno smanjenje vlage, no s velikim izazovima energetske učinkovitosti i vremenskog trajanja procesa. Integracijom različitih tehnologija sušenja poput mikrovalnog, infracrvenog i radiofrekvencijskog, doprinosi se značajnim poboljšanjem u brzini i energetske učinkovitosti procesa. Kombinirane metode sušenja pokazale su se posebno učinkovitim, omogućujući optimalne uvjete za proces sušenja, smanjujući rizik od prekomjernog sušenja ili nedovoljno osušenih zrna. Ove tehnologije ne samo da poboljšavaju energetske parametre i brzinu sušenja, već također osiguravaju očuvanje nutritivnih i organoleptičkih svojstava žitarica. Uvođenjem ovih tehnologija u praksu može se značajno unaprijediti poljoprivredna proizvodnja, osiguravajući sigurnost i kvalitetu žitarica tijekom skladištenja i distribucije. Nadalje, inovativne metode sušenja imaju potencijal smanjiti ekološki otisak poljoprivrednih aktivnosti, što je ključno za održivi razvoj. Kroz kontinuirana istraživanja i prilagodbe ovih tehnologija moguće je dodatno unaprijediti učinkovitost i prilagodljivost procesa sušenja različitim vrstama žitarica, čime se doprinosi boljoj iskoristivosti resursa i kvaliteti proizvoda na tržištu.

Literatura

- Brandić, I., Pezo, L., Krička, T., Voća, N., Matin, A. (2024).** *Primjena modela umjetnih neuronskih mreža u modeliranju procesa sušenja zrna kukuruza.* In 59. hrvatski i 19. međunarodni Simpozij agronoma (pp. 536-541).
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., Basak, T. (2013).** *Microwave food processing—A review.* *Food research international*, 52(1), 243-261.
- Dev, S.R., Raghavan, V.G. (2014).** *Radio-frequency drying of food materials.* *Radio-Frequency Heating in Food Processing: Principles and Applications.* CRC Press, New York, 215-230.
- Guo, Q., Sun, D.W., Cheng, J.H., Han, Z. (2017).** *Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry.* *Trends in Food Science & Technology*, 67, 236-247.
- Hemis, M., Bettahar, A., Singh, C. B., Bruneau, D., Jayas, D. S. (2009).** *An experimental study of wheat drying in thin layer and mathematical simulation of a fixed-bed convective dryer.* *Drying Technology*, 27(10), 1142-1151.
- Krička, T., Voća, N., Jukić, Ž. (2001).** *Technological and nutritional characteristics of a kernel of maize exposed to a "cooking treatment",* *Czech Journal of Animal Science*, 46 (5): 213 -216.
- Krička, T., Matin, A., Horvatić, T., Kiš, G., Voća, N., Jurišić, V., Grubor, M. (2017).** *Nutritivni sastav oljuštenog zrna ječma nakon termičke dorade sušenjem i uparavanjem.* *Krmiva: Časopis o hranidbi životinja, proizvodnji i tehnologiji krme*, 59(2), 51-60.
- Krička, T., Grubor, M., Matin, A. (2019).** *Utjecaj FAO grupe hibrida kukuruza na brzinu otpuštanja vode sušenjem i hranidbenu vrijednost zrna.* 47 International Symposium Actual Tasks on Agricultural Engineering (pp. 323-332).
- Liu, H., Liu, H., Liu, H., Zhang, X., Hong, Q., Chen, W., Zeng, X. (2021).** *Microwave drying characteristics and drying quality analysis of corn in China.* *Processes*, 9(9), 1511.
- Mao, Y., Wang, S. (2023).** *Recent developments in radio frequency drying for food and agricultural products using a multi-stage strategy: A review.* *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(16), 2654-2671.
- Mahmood, N., Liu, Y., Munir, Z., Zhang, Y., Niazi, B. M. K. (2022).** *Effects of hot air assisted radio frequency drying on heating uniformity, drying characteristics and quality of paddy.* *LWT*, 158, 113131.
- Matin, A., Krička, T., Jurišić, V., Bilandžija, N., Kuže, I., Voća, N. (2013).** *Kvalitativne i energetske promjene ploda lješnjaka u procesu konvekcijskog sušenja.* *Krmiva: Časopis o hranidbi životinja, proizvodnji i tehnologiji krme*, 55(1), 11-19.
- Matin, A., Špelić, K., Radić, T., Vašarević, T., Matin, B. (2022).** *Dorada i skladištenje krumpira.* *Glasnik zaštite*

bilja, 45(6.), 110-115.

Matin, A., Brandić, I., Majdak, T., Metić, L., Matin, B. (2024). Dorada i skladištenje lana. *Glasnik Zaštite Bilja*, 47(3).

Nair, G. R., Li, Z., Garipey, Y., Raghavan, V. (2011). Microwave drying of corn (*Zea mays* L. ssp.) for the seed industry. *Drying Technology*, 29(11), 1291-1296.

Karimi, F. (2010) 'Properties of the drying of agricultural products in microwave vacuum: A review article'; *Journal of Agricultural Technology*, 6(2), pp. 269–287. Available at: <http://www.ijat-rmutto.com>. Raghavan, V.G.S., Sosle, V. (2014). 'Grain drying'; *Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition, (January 2007)*, pp. 557–566. Available at: <https://doi.org/10.1201/b17208>.

Ranjbaran, M., Emadi, B., Zare, D. (2014). CFD simulation of deep-bed paddy drying process and performance. *Drying technology*, 32(8), 919-934.

Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R., Sharma, S. C. (2020). Infrared drying of food materials: Recent advances. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 381-398.

Tuncel, N.B., Yilmaz, N.E.Ş.E., Kocabiyik, H., Oztürk, N., Tunçel, M. (2010). The effects of infrared and hot air drying on some properties of corn (*Zea mays*). *Journal of Food Agriculture & Environment*, 8(1), 63-68.

Volgin, A. V., Kargin, V. A., Chetverikov, E. A., Moiseev, A. P., Lagina, L. A. (2022). Improving the efficiency of convective grain drying by using low-intensity RF radiation. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 954, No. 1, p. 012017)*.

Xie, Y., Zhang, Y., Xie, Y., Li, X., Liu, Y., Gao, Z. (2020). Radio frequency treatment accelerates drying rates and improves vigor of corn seeds. *Food chemistry*, 319, 126597.

Ziegler, V., Paraginski, R.T., Ferreira, C.D. (2023) 'Effects of drying conditions on grain quality: a review'; *Concilium*, 23(8), pp. 37–56. Available at: <https://doi.org/10.53660/clm-1249-23e13>.

Prispjelo/Received: 1.6.2024.

Prihvaćeno/Accepted: 2.7.2024.

Review paper

Innovative technologies for drying cereal grains

Abstract

Effective post-harvest drying of cereal grains is essential to maintain quality during transportation and storage due to increased grain moisture. Conventional drying methods rely on a controlled flow of heated air to ensure uniform drying and moisture reduction, while innovative drying technologies have also been developed to improve the efficiency and energy efficiency of the entire process. There are different types of innovative drying, the most important of which are described in this paper (microwave, infrared, fluidized bed and high frequency drying). Microwave drying technologies in combination with heated air enable fast and energy-efficient drying. Infrared drying shortens the drying time and improves the quality of the dried grain. Fluidized-bed drying enables large quantities of grain to be dried evenly in a shorter time, while high-frequency drying enables the grain to be refined quickly, evenly and efficiently. Combined drying technologies make it possible to achieve optimum conditions for the drying process. In this paper, the efficiency, advantages and challenges of using the different drying technologies are analyzed and a comparative analysis is carried out. The aim is to provide a comprehensive insight that facilitates the understanding and implementation of said technologies and shows how the developed drying technologies can make a significant contribution to agricultural production to ensure the safety and quality of grain during storage and distribution.

Key words: drying, innovative technologies, energy efficiency, grain.