



Nanokapsułki w przemyśle mleczarskim - stan wiedzy i najnowsze trendy

Katarzyna Turek

Katedra Przetwórstwa Produktów Zwierzęcych,

Wydział Technologii Żywności, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie

e-mail: katarzyna.turek@urk.edu.pl

Wprowadzenie

Wiele gałęzi przemysłu od dłuższego czasu poszukuje sposobu wykorzystania nanotechnologii. Rozwój nanotechnologii w żywności postępuje znacznie szybciej niż w przypadku opracowywania nanoleków i nanofarmaceutyków. Efektywne dostarczanie substancji bioaktywnych, bioseparacja białek i nanokapsułkowanie nutraceutyków to tylko niektóre z nowych rozwiązań pojawiających się w nanotechnologii żywienia i rolnictwa. Dalszy postęp w tych dziedzinach nauki opiera się również na nanopowłokach i ich zastosowaniu w opakowaniach. Przemysłowcy, naukowcy i badacze wychodzą naprzeciw potrzeb tych segmentów, stosując rozwiązania nanotechnologiczne. Badają oni wpływ nanotechnologii na wartości odżywcze, efektywne dostarczanie związków odżywczych, wydłużenie przydatności do spożycia i odpowiednie właściwości mechaniczne.

Nanotechnologia w przemyśle spożywczym

Nanoemulsje obejmują cząstki zazwyczaj o średnicy poniżej 500 nm, które w porównaniu z tradycyjnymi emulsjami tworzą krople odporne na agregację. Charakteryzują się one małym rozmiarem kropli oraz stabilnością kinetyczną. Są coraz częściej rekomendowane do potencjalnego zastosowania w przemyśle spożywczym [21]. Wykazują one istotne korzyści w porównaniu z tradycyjnymi emulsjami, co czyni je odpowiednimi do różnorodnych zastosowań. Nanoemulsje są badane pod kątem kapsułkowania związków biologicznie czynnych rozpuszczalnych w lipidach, takich jak substancje nutriogeniczne, aromaty i przeciwutleniacze [3,16].



Zastosowanie nanoemulsji w przypadku tych związków poprawia ich rozpuszczalność, stabilność i biodostępność. Wspomagają ich efektywne dostarczanie do żywności, chroniąc je przed uszkodzeniem podczas przetwarzania lub przechowywania. Mogą zawierać substancje przeciwdrobnoustrojowe, które wydłużają okres przydatności do spożycia, zachowując jednocześnie wartość odżywczą [7,20]. Ponadto, warstwa zewnętrzna małych kropli nanoemulsji chroni je przed czynnikami środowiskowymi, takimi jak światło, ciepło, wilgoć i tlen, które mogą powodować utratę ich bioaktywnych składników [12]. To zamknięcie wewnątrz zapobiega utlenianiu i parowaniu związków lotnych. Ponadto, kulisty kształt kropelek zapewnia wysoki stosunek powierzchni do objętości, co sprzyja lepszej interakcji z otaczającym medium [24]. Nanotechnologia w żywności przyczynia się też do zmiany funkcji żywieniowych i zmniejszenia ilości substancji chemicznych i patogenów w żywności [21].

Nanotechnologia zrewolucjonizowała nasze podejście do inżynierii żywności (od produkcji do przetwórstwa), przechowywania żywności oraz tworzenia nowych materiałów i produktów. W celu zwiększenia przyswajalności różnych substancji aktywnych takich jak witaminy, karotenoidy, substancje zapachowe, probiotyki, środki przeciwdrobnoustrojowe, przeciwutleniacze, peptydy i białka, kwasy tłuszczowe omega, barwniki i substancje konserwujące są one przenoszone za pomocą odpowiednich systemów dostarczania (np. z pomocą nanostruktur), a nie dodawane w czystej postaci. Przetwarzanie pożywienia wpływa negatywnie na substancje aktywne i zmniejsza ich przyswajalność. Aby temu zapobiec, substancje te można poddać procesom nanokapsułkowania i tworzenia nanoemulsji. Związki nieorganiczne, takie jak dwutlenek krzemu, tlenek magnezu i tlenek tytanu (IV) w formie nanostruktury są stosowane do powlekania. Korzystanie z nich przy produkcji żywności budzi obawy dotyczące zdrowia. Otrzymane produkty muszą jednak przejść wymaganą kontrolę jakości i analizę toksyczności zanim zostaną wprowadzone na rynek. Kapsułkowanie w nanoemulsjach może zwiększyć korzyści zdrowotne płynące ze spożywania kurkuminy, naturalnego barwnika obecnego w kurkumie, odpowiedzialnego za jej żółty kolor [13].

Obecnie rozwijane jest nanokapsułkowanie silnie skoncentrowanych ekstraktów zawierających związki lotne wyekstrahowane z roślin [10]. Wyprodukowano także burgery, w których mięsie zastosowano jako dodatek substytut tłuszczu składający się z nanokapsułkowanego oleju z acai [10]. Nanokapsułkowanie substancji czynnych zapewnia także kontrolowane uwalnianie substancji w pożądanej lokalizacji w przewodzie pokarmowym i wydłużenie czasu jej działania. Jednakże składniki liofilowe, takie jak fitosterole, antyoksydanty lub karotenoidy, można z łatwością rozpuszczać w wodzie dzięki nanotechnologii. Różnorodne związki (m.in. likopen, β -karoten, fitosterole) są zintegrowane z nanoosiłnikami i używane do produkcji zdrowej żywności, głównie by zapobiec odkładaniu się cholesterolu w organizmie. Dodatkowo, nanokapsułkowanie różnych bioaktywnych składników jest wykorzystywane jako dodatek do produkcji funkcjonalnych powłok i folii, stosowanych w celu wydłużenia stabilności przechowalniczej żywności [8,15].



Zastosowanie nanotechnologii w mleczarstwie

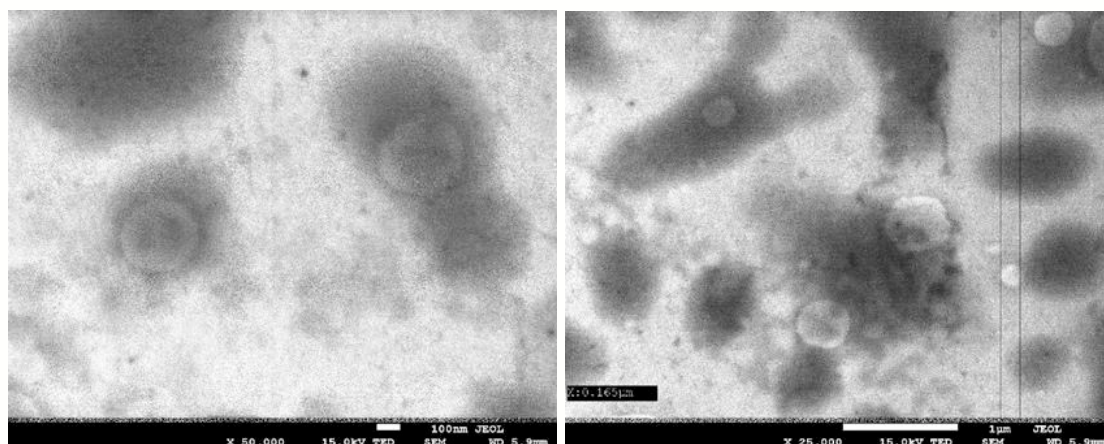
Nanokapsułkowanie to technika pozwalająca na przechowywanie substancji w miniaturowej postaci, co zapewnia większą przyswajalność biologiczną, kontrolowane uwalnianie składników, wydłużony czas obecności w organizmie oraz większą trwałość substancji bioaktywnych. Bakterie probiotyczne, takie jak *Lactocaseibacillus casei*, *Lactocaseibacillus rhamnosus*, *Bifidobacterium spp.* mogą być dodawane w technologii mleka fermentowanego, napoju roślinnego oraz napojów owocowych [15]. Ich liczebność w produktach spożywczych można zwiększyć dzięki nanokapsułkowaniu. Umożliwia ono opracowanie preparatów zawierających bakterie probiotyczne, które są potem dostarczane w określone części układu pokarmowego, gdzie oddziałują na konkretne receptory [22,9]. Kazeina i inne preparaty białek mleka mogą posłużyć jako nanonośnik. Dzięki temu mogą zostać wykorzystane do dostarczania składników odżywczych i tym samym przyczynić się do zmniejszenia ryzyka niedoborów [19].

W ostatnich latach duże zainteresowanie budzą produkty mleczne z dodatkiem prozdrowotnych ekstraktów roślinnych poddanych nanokapsułkowaniu. Badano wpływ dodatku nanokapsułkowanego ekstraktu z brokuła [4] oraz nasion chia [11] na właściwości sera ricotta. Analizowano także działanie ekstraktu lub zmielonych nasion kozieradki na właściwości jogurtów oraz serów [6,2]. Emulsja Pickeringa, nanokompleksy, powlekane mikrokuleczki, powlekane liposomy, emulzele, kulki emulsyjne i wielocząsteczkowe suszone mikrokapsułki okazały się obiecujące w kontekście wzbogacania jogurtu naturalnymi ekstraktami roślinnymi. Jogurt wzbogacony substancją bioaktywną w postaci nanokapsułek zapewniał lepszą ochronę zawartych w nich związków podczas przechowywania i trawienia w przewodzie pokarmowym, a także wykazywał lepsze działanie w leczeniu stanów zapalnych jelit, anemii, otyłości i niektórych rodzajów nowotworów [18].

Dzięki wydajnemu dostarczaniu substancji do organizmu człowieka, zapewnionemu przez nanokapsułkowanie, można zmniejszyć masę składników aktywnych. Technika nanokapsułkowania umożliwia produkcję żywności o zwiększonej funkcjonalności, trwałości i przyswajalności składników. Co więcej, zapewnia ona ochronę składników bioaktywnych (takich jak białka, witaminy rozpuszczalne w tłuszczach, węglowodany i antyoksydanty) przed działaniem szkodliwych warunków. Najnowsze badania wykazały, że jogurty wzbogacone synbiotycznymi mikrokapsułkami mogą wykazywać większy potencjał w utrzymaniu mikrośrodowiska jelitowego poprzez działanie synergistyczne [9,17]. Aby zweryfikować skuteczność wzbogaconych jogurtów, zaleca się przeprowadzenie większej liczby badań *in vivo*, głównie klinicznych z udziałem ludzi. Niestety, część związków stosowanych przy nanokapsułkowaniu nie jest odpowiednia dla naszego zdrowia. Związki te powinny być nietoksyczne i łatwe do rozłożenia przez organizm. Należałoby zapewnić należytą ocenę toksyczności, która określałaby czy dany produkt stosowany podczas wytwarzania nanoemulsji jest bezpieczny dla organizmu człowieka.



Opracowano metodę nanokapsułkowania oleju z orzechów włoskich i zastosowanie go jako dodatku do jogurtu. Do wytworzenia nanoemulsji wykorzystano jedynie odtłuszczone mleko w proszku, które jest powszechnie stosowanym dodatkiem w procesie produkcji mleka fermentowanego [22]. Przeprowadzone badania potwierdzają skuteczną emulgację oleju roślinnego w fazie wodnej mleka oraz wykorzystanie mleka w proszku do wytworzenia nanokapsułek i stabilizacji nanoemulsji bez użycia surfaktantów czy emulgatorów, co jest niezwykle istotne w kontekście obecnego trendu dążenia do uzyskania tzw. „czystej etykiety” produktów spożywczych.



Rycina 1. Zdjęcie mikroskopowe SEM/TEM jogurtu z nanokapsułkami w powiększeniu x50000 oraz x25000 [fot. IKiFP PAN]

W ramach badań realizowanych w projekcie SUP-RIM podjęto próbę opracowania receptury jogurtu z dodatkiem nanokapsułkowanego, prozdrowotnego oleju z pestek granatu oraz witaminy D₃. Przeprowadzone badania wskazują na nowe możliwości wzbogacania produktów mlecznych w oleje roślinne w formie nanokapsułkowanej i stanowią ewentualne uzupełnienie diety, będąc alternatywą dla doustnych suplementów. Dalsze badania są kontynuowane z wykorzystaniem innych prozdrowotnych dodatków np. kwasu foliowego czy oleju z kozieradki w formie nanoemulsji i ich dodatków do pozostałych rodzajów mleka fermentowanego i serów.

Literatura

1. Acharya D.R., Liu S., Lu H., Albashir D., Koirala P., Shi Y., Chen Q. (2024). Nanoemulsion-integrated gelatin/bacterial cellulose nanofibril-based multifunctional film: Fabrication, characterization, and application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257, 128341.
2. Alu'datt M.H., Rababah T., Al-ali S., Tranchant C. C., Gammoh S., Alrosan M., Kubow S., Tan T.-C., Ghatasheh S. (2024). Current perspectives on fenugreek bioactive compounds and their potential impact on human health: A review of recent insights into functional foods and other high value applications. *Journal of Food Science*, 89, 1835-1864.



3. Anvar S.A., Allahyaribeik S., Ataee M., Ahari H., Rahimian M., Golestan L. (2024). Apparatus and method for producing nanoemulsions: U.S. Patent Application. 18(450), 105.
4. Azarashkan Z., Motamedzadegan A., Ghorbani-HasanSaraei A., Biparva P., Rahaiee S. (2022). Investigation of the physicochemical, antioxidant, rheological, and sensory properties of ricotta cheese enriched with free and nano-encapsulated broccoli sprout extract. Food Science and Nutrition, 10, 4059–4072.
5. Centurion F., Basit A. W., Liu J., Gaisford S., Rahim, M. A., Kalantar-Zadehn K. (2021). ACS Nano. 15(12).
6. El-Dardiry A., Nasser A., Shahin A. (2023). The effect of fortifying bio UF-labneh with germinated fenugreek seed flour on the physicochemical, microbial, rheological, and sensory properties. Egyptian Journal of Chemistry, 66(8), 251-266.
7. Giaconia M.A., dos Passos Ramos S., Pereira C. F., Lemes A.C., De Rosso V.V., Braga A.R.C. (2020). Overcoming restrictions of bioactive compounds biological effects in food using nanometer-sized structures. Food Hydrocolloids, 107, 105939.
8. Grzebieniarz W., Nowak N., Khachatryan G., Krzan M., Krystijan M., Kosiński J., Khachatryan K. (2021). The preparation and characterization of quantum dots in polysaccharide carriers (starch/chitosan) as elements of smart packaging and their impact on the growth of microorganisms in food. Materials, 14, 7732.
9. Gullo M., Zotta T. (2022). Probiotics in dairy products: microencapsulation and delivery. Advances in Dairy Microbial Products, Woodhead Publishing, 271-285.
10. Hanula M., Szpicer A., Górska-Horczyk E., Khachatryan G., Pogorzelska-Nowicka E., Poltorak A. (2022). Quality of beef burgers formulated with fat substitute in a form of freeze-dried hydrogel enriched with açai oil. Molecules. 9, 27(12), 3700.
11. Hosseini F., Motamedzadegan A., Raeisi S. N., Rahaiee S. (2022). Antioxidant activity of nanoencapsulated chia (*Salvia hispanica* L.) seed extract and its application to manufacture a functional cheese. Food Science and Nutrition, 15, 11(3), 1328-1341.
12. Jamir Y., Bhushan M., Sanjukta R., Robindro Singh L. (2024). Plant-based essential oil encapsulated in nanoemulsions and their enhanced therapeutic applications: An overview. Biotechnology and Bioengineering, 121(2), 415-433.
13. Jiang T., Liao W., Charcosset C. (2020). Recent advances in encapsulation of curcumin in nanoemulsions: A review of encapsulation technologies, bioaccessibility and applications. Food Research International, 132, 109035.
14. Kalateh-Seifari F., Ahari H., Moradi S. (2025). A review on the food-based applications of nanometric plant-based essential oils: nanoencapsulation and nanoemulsion production challenges, Food and Bioprocess Technology, 18, 6095-6115.



15. Khachatryan G., Khachatryan K., Krystyjan M., Krzemińska-Fiedorowicz L., Lenart-Boroń A., Białecka A., Krupka M., Krzan M., Blaszyńska K., Hanula M. (2023). Synthesis and investigation of physicochemical and biological properties of films containing encapsulated propolis in hyaluronic matrix. *Polymers*, 15, 1271.
16. Prado J. C. S., Prado G. M., Aguiar F. L. L., Neves A. M., do Nascimento J. F., da Silva Abreu F. O. M., dos Santos Fontenelle R. O. (2024). Nanoemulsions of plant-based bioactive compounds with antimicrobial applications: A review. *Ciência e Natura*, 46, 74325-4325.
17. Shishir M. R. I., Saifullah M., Hashim S. B. H., Aalim H., Bilal M., Khan S., Marappan G., Tahir H. E., Li Zhihua L., Zhai X., Arslan M., Taip F. S., Cheng K., Zou X. (2024). Micro and nano-encapsulated natural products in yogurt: An emerging trend to achieve multifunctional benefits in product quality and human health, *Food Hydrocolloids*, 154, 110124.
18. Semo E., Kesselman E., Danino D., Livney Y.D. (2007). Casein micelle as a natural nano-capsular vehicle for nutraceuticals. *Food Hydrocolloids*, 21, 936-942.
19. Singh I. R., Pulikkal A. K. (2022). Preparation, stability and biological activity of essential oil-based nano emulsions: A comprehensive review. *OpenNano*, 8, 100066.
20. Sneha K., Kumar A. (2022). Nanoemulsions: Techniques for the preparation and the recent advances in their food applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102914.
21. Turek K., Khachatryan G., Khachatryan K., Krystyjan M. (2023). An innovative method for the production of yoghurt fortified with walnut oil nanocapsules and characteristics of functional properties in relation to conventional yoghurts. *Foods*, 12, 3842.
22. Vidhyalakshmi R., Bhakyaraj R., Subhasree R. (2009). Encapsulation "The Future of Probiotics"—A Review. *Advances in Biological Research*, 3, 96-103.
23. Worku L. A., Bachheti A., Chaubey K. K., Bachheti R. K., Husen A. (2023). Antimicrobial activities of nanoemulsion current trends in green nano-emulsions: Food, agriculture and biomedical sectors. 143–156.