



## Mleczarstwo komórkowe: zarys technologii i perspektyw rozwoju

\*Katarzyna Szambelan

Katedra Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego, Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu,  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

\*Kontakt e-mail: [katarzyna.szambelan@up.poznan.pl](mailto:katarzyna.szambelan@up.poznan.pl)

### Mleczarstwo komórkowe

Mleczarstwo komórkowe jest dziedziną biotechnologii żywności, która polega na wytwarzaniu substytutu mleka lub funkcjonalnych składników mleka (np. białek, tłuszczów) bez udziału zwierząt hodowlanych, z wykorzystaniem kultur komórkowych lub mikroorganizmów uzyskanych metodami inżynierii genetycznej poprzez wprowadzanie genów kodujących konkretne białka mleka. Mleczarstwo komórkowe stanowi część szerszego zagadnienia określanego jako rolnictwo komórkowe (cellular agriculture), które obejmuje również m.in. produkcję jaj czy mięsa. Technologia mleczarstwa komórkowego opiera się przede wszystkim na technologii fermentacji precyzyjnej oraz na hodowli komórek zwierzęcych. W mleczarstwie komórkowym procesy biologiczne, które zachodzą w organizmach zwierzęcych, zostają przeniesione do kontrolowanych systemów zamkniętych przy minimalnym zapotrzebowaniu na wodę i na areal rolniczy wykorzystywany przy hodowli zwierząt i uprawie roślin paszowych [14, 20]. Według raportów Good Food Institute [9] wiele państw na świecie coraz częściej skłania się do stosowania białka alternatywnego w perspektywie ochrony środowiska, zahamowania zmian klimatycznych i wspomaganie sektora rolniczego.



## Fermentacja precyzyjna i hodowla komórkowa

Najczęściej stosowaną i bardziej rozwiniętą przemysłowo technologią produkcji białka komórkowego jest tzw. fermentacja precyzyjna, która łączy różne techniki fermentacji, inżynierię genetyczną i biologię syntetyczną [13, 22]. Metoda ta polega na zidentyfikowaniu genu kodującego dane białko mleka (jak  $\beta$ -laktoglobulinę,  $\alpha$ -laktoalbuminę czy kazeiny ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\kappa$ -)). Następnie gen zostaje syntetycznie odtworzony i wprowadzony do łańcucha DNA komórki mikroorganizmu (np. bakterii lub grzybów, w tym drożdży) za pomocą technik inżynierii genetycznej w celu wytworzenia pożądanego produktu. Spośród mikroorganizmów grzyby zostały wskazane jako najbardziej odpowiednie do fermentacji precyzyjnej ze względu na dużą zdolność dostosowania się do środowiska [14]. Szczepy mikroorganizmów stosowane do wytwarzania białek metodą fermentacji precyzyjnej są przede wszystkim wybierane pod kątem braku potencjalnej toksyczności, tempa wzrostu i wydajności. Podczas hodowli zmodyfikowanego mikroorganizmu prowadzonej w bioreaktorze syntetyzowane są białka mleka. Wyprodukowane białko następnie jest oddzielane od masy komórkowej, oczyszczane i wykorzystywane do wytwarzania substytutów produktów mlecznych (np. jogurtów, serów). Efektem takiej hodowli jest uzyskiwanie białek identycznych strukturalnie z białkami obecnymi w mleku krowim [4, 18].

Natomiast hodowla białka komórkowa (cell-based milk) polega na pobraniu niewielkiej próbki komórek gruczołu mlekowego zwierzęcia, umieszczeniu ich w bioreaktorze i namnożeniu. Komórki te syntetyzują białka mleka w kontrolowanych warunkach (pH, temperatura, składniki odżywcze) i na odpowiednich pożywkach. W technologii tej wymagane są: zaawansowany system bioreaktorów z odpowiednią wymianą gazową, kontrola sterylności i dostęp do składników podłoża. Efektem takiej hodowli jest wytworzenie substytutu mleka o składzie bardzo zbliżonym do mleka naturalnego [5].

Kilka firm na świecie zajmuje się produkcją komórkowego białka mleka [14]. Jedną z najbardziej znanych, która opracowała technologię produkcji białka serwatkowego, jest firma Perfect Day.

## Korzyści technologii mleczarstwa komórkowego

Rozwój mleczarstwa komórkowego może w znacznym stopniu ograniczyć obciążenie środowiska naturalnego (niższy ślad węglowy) w porównaniu z tradycyjnym mleczarstwem, szczególnie jeśli dodatkowo energia wykorzystywana w procesie pochodzi ze źródeł odnawialnych [25]. Badania wskazują, że produkcja białek mlecznych metodą fermentacji precyzyjnej może generować o 72-97% niższe emisje GHG (Greenhouse Gases) niż hodowla krów i tradycyjne pozyskiwanie mleka [1]. Znaczenie ma jednak także energochłonność całego procesu i źródła wykorzystywanej energii. W tradycyjnym pozyskiwaniu mleka zużywane są znaczne ilości wody zarówno do pojenia krów, jak i do produkcji paszy. Technologia mleczarstwa komórkowego eliminuje te etapy, redukując zużycie wody nawet o 81–99% w porównaniu z tradycyjnymi procesami produkcji mleka [1, 2]. Taka technologia, która odbywa się w instalacjach przemysłowych, może zmniejszyć konieczność wylesiania znacznych ilości ziemi i jej degradację [13, 17]. Niemniej jednak całkowity bilans środowiskowy zależeć będzie od skali produkcji czy efektywności technologii.



Z punktu widzenia biochemii białka produkowane metodą fermentacji precyzyjnej naśladują te, które znajdują się w mleku. Białka komórkowe zachowują tę samą sekwencję aminokwasów, wykazują podobne właściwości funkcjonalne oraz zawierają bioaktywne peptydy [13, 16]. Oznacza to jednak, że osoby z alergią na białka mleka mogą nadal reagować uczuleniem [14]. Do zalet mleczarstwa komórkowego należy także zaliczyć możliwość kontrolowania profilu białek i lipidów, co pozwala otrzymać produkty dopasowane do potrzeb żywieniowych konsumentów. Kontrolowana hodowla w bioreaktorze może również zmniejszyć ryzyko obecności antybiotyków czy hormonów, które mogą występować w mleku pochodzącym z tradycyjnej hodowli [14]. Nadal trwają badania nad projektowaniem składu gotowego produktu, np. eliminacja laktozy, zmniejszenie alergenicności rekombinowanych białek, jednakże eliminacja alergenów wymagałaby dalszej modyfikacji [10].

### Wyzwania mleczarstwa komórkowego

Znacznym wyzwaniem w mleczarstwie komórkowym jest możliwość przeniesienia produkcji na skalę przemysłową, borykając się m.in. z dużą energochłonnością bioreaktorów, utrzymaniem stabilnej wydajności oraz minimalizacją kosztów surowcowych [13, 14]. Koszty produkcji mleczarstwa komórkowego są znacznie wyższe niż w tradycyjnym mleczarstwie, choć postęp technologiczny dąży do ich obniżenia poprzez optymalizację mediów hodowlanych i procesów bioreaktorowych [23]. Bezpieczeństwo produktów wytwarzanych metodą fermentacji precyzyjnej wymaga wnikliwej oceny mikrobiologicznej, toksykologicznej i żywieniowej. Analizie podlega m.in. czystość uzyskanego białka i brak pozostałości organizmów produkcyjnych w gotowym substracie [13]. Poza tym produkty spożywcze pochodzące z hodowli komórkowej muszą być odpowiednio regulowane i podlegają przepisom dotyczącym tzw. nowej żywności (Novel Food), a oceny bezpieczeństwa dokonuje EFSA (European Food Safety Authority) [24]. Ograniczeniami w produkcji na skalę przemysłową mogą okazać się wysokie koszty mediów hodowlanych, separacji i oczyszczania otrzymanych białek, koszty energii czy bioreaktorów przemysłowych [14, 23]. Bardzo ważnym aspektem i wyzwaniem technologii mleczarstwa komórkowego jest ocena bezpieczeństwa mikrobiologicznego, która ma kluczowe znaczenie w akceptacji społecznej związanej z obawami dotyczącymi m.in. organizmów modyfikowanych genetycznie (GMO) wykorzystywanych w fermentacji precyzyjnej [22]. Jedną z głównych wątpliwości jest obecność rekombinowanego DNA (rDNA) w końcowym produkcie spożywczym. Konsumenci są podzieleni w ocenie i akceptacji żywności „komórkowej”, która postrzegana jest jako produkt sztuczny lub wysoko przetworzony [7, 21]. Jest zatem oczywiste, że wytwarzane białka komórkowe muszą zostać dokładnie scharakteryzowane w ramach oceny ryzyka toksyczności i alergenicności.



## Podsumowanie

Pomimo że technologie mleczarstwa komórkowego cały czas się rozwijają, ich udział w globalnym rynku mleka pozostaje niewielki, a pełne zastąpienie tradycyjnych produktów mlecznych jest w najbliższym czasie mało prawdopodobne [13, 14]. Rolnictwo komórkowe zyskuje na popularności jako nowa zrównoważona technologia produkcji żywności, która może stopniowo wywierać pozytywny wpływ na środowisko i społeczeństwo. Mleczarstwo komórkowe może w przyszłości stanowić uzupełnienie tradycyjnej produkcji lub zdominować rynek w rejonach bardzo zaludnionych, o ograniczonych zasobach ziemi i wody. Jest to zaawansowana biotechnologia, która może zminimalizować negatywny wpływ na środowisko, zapewnić jakość i ilość wytwarzanych produktów, jednocześnie jednak generuje pytania o etykę, aspekty społeczno-polityczne i przyszłość tradycyjnego rolnictwa. Obecnie brakuje długofalowych badań nad tym, jak rolnictwo i polska wieś odczują rozwój technologii komórkowej w technologii żywności. Istnieje także duże prawdopodobieństwo koncentracji rynku rolnictwa komórkowego w rękach tylko dużych firm technologicznych. Technologia mleczarstwa komórkowego wykazuje duży potencjał środowiskowy i innowacyjny, ale wymaga dalszych badań dotyczących optymalizacji energetycznej, bezpieczeństwa oraz akceptacji konsumenckiej. Mleczarstwo komórkowe jest technologią o dużym potencjale środowiskowym i innowacyjnym i być może będzie w przyszłości funkcjonowało obok tradycyjnego mleczarstwa, oferując produkty o niższym śladzie środowiskowym, pozbawione np. laktozy lub skierowane do środowisk o specyficznych wymaganiach etycznych. W obliczu szybkich zmian w kierunku wydajnej i zrównoważonej produkcji żywności ważne jest jednak, aby przede wszystkim bezpieczeństwo konsumentów pozostało najwyższym priorytetem.

## Literatura

1. 10 Emerging Technology Solutions for Planetary Health. World Economic Forum. Insight Report October 2025. In collaboration with Frontiers.
2. Behm K., Nappa M., Aro N., Welman A., Ledgard S., Suomalainen M., Hill J. (2022). Comparison of carbon footprint and water scarcity footprint of milk protein produced by cellular agriculture and the dairy industry. *International Journal of Life Cycle Assessment* 27, 1017–1034.
3. Bon Vivant's peer-reviewed LCA confirms precision fermentation's environmental edge over dairy. November 4, 2024. <https://www.proteinproductiontechnology.com/post/bon-vivants-peer-reviewed-lca-confirms-precision-fermentations-environmental-edge-over-dairy>.
4. Eastham J.L., Leman A.R. (2024). Precision fermentation for food proteins: ingredient innovations, bioprocess considerations, and outlook — a mini-review. *Current Opinion in Food Science* 58, 10119.
5. FAO & WHO. 2023. Food safety aspects of cell-based food. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc4855en>



6. FAO. Climate change and the global dairy cattle sector. The role of the dairy sector in a low-carbon future. Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and Global Dairy Platform Inc. Rome, 2019
7. Food Standards Agency (2025). A rapid evidence review on consumer responses to cell-cultivated products. FSA Research and Evidence, 1-62.
8. Good Food Institute APAC. 2023 State of the Industry Report.
9. Good Food Institute. 2023 State of Global Policy. Public investment in alternative proteins to feed a growing world.
10. Hao L., Wang S., Ji W. (2025). Cow's milk protein allergy: A comprehensive review of epidemiology, pathogenesis, clinical manifestations, diagnostics, and management strategies. Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition 34 (3), 298–307.
11. Hettinga K., Bijl E. (2022). Can recombinant milk proteins replace those produced by animals? Current Opinion in Biotechnology 75, 102690.
12. IPCC (2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. ISBN 978-92-9169-160-9
13. Knychala M.M., Boing L.A., Ienczak J.L., Trichez D., Stambuk B.U. (2024). Precision fermentation as an alternative to animal protein: A review. Fermentation 10 (6), 315.
14. Kwon H.C., Jung H.S., Kothuri V., Han S.G. (2024). Current status and challenges for cell-cultured milk technology: a systematic review. Journal of Animal Science and Biotechnology 8, 15 (1), 81.
15. Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. (2012). A global assessment of water footprint of farm animal products. Ecosystems 15, 401–415.
16. Meleti E., Koureas M., Manouras A., Giannouli P., Malissiova E. (2025). Bioactive peptides from dairy products: A systematic review of advances, mechanisms, benefits, and functional potential. Dairy 6, 65, 1-28.
17. Nielsen M.B., Meyer A.S., Arnau J. (2024). The next food revolution is here: Recombinant microbial production of milk and egg proteins by precision fermentation. Annual Review of Food Science and Technology 15 (1), 173-187.
18. Piazenski I. N., Candelário J. P. M., Soccol V. T., Vandenberghe L. P. de S., Pereira G. V. de M., Soccol C. R. (2024). From lab to table: The path of recombinant milk proteins in transforming dairy production. Trends in Food Science and Technology, 149, 104562.



19. Poore J., Nemecek T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* (New York, N.Y.), 360 (6392), 987–992.
20. Rischer H., Szilvay G.R., Oksman-Caldentey K.M. (2020). Cellular agriculture - industrial biotechnology for food and materials. *Current Opinion in Biotechnology*. 61, 128-134.
21. Szendrő K. (2025). Consumer perceptions of lab-grown cells: Awareness, barriers, and the power of information. A review. *Czech Journal of Animal Science* 70 (6), 203-222.
22. Verma K., Duhan P., Pal D., Verma P., Bansal P. (2025). Precision fermentation for the next generation of food ingredients: Opportunities and challenges. *Future Foods* 12, 100750.
23. Wang Z., Wu Y., Lv X., Li J., Liu L., Du G., Chen J., Liu Y. (2026). Advances in the biosynthesis of milk proteins fueled by synthetic biology. *Agricultural Products Processing and Storage* 2, 33.
24. Yart L., Wijaya A.W., Lima M.J., Haller C., van der Beek E.M., Carvalho R.S., Kraus M.R.C., Mashinchian O. (2023). Cellular agriculture for milk bioactive production. *Nature Reviews Bioengineering* 1, 858–874.
25. Zanni S., Roccaro M., Bocedi F., Peli A., Bonoli A. (2022). LCA to estimate the environmental impact of dairy farms: A case study. *Sustainability*, 14 (10), 6028.