



Związki lotne w mleku i produktach mleczarskich – metody ich oceny

Marika Magdalena Bielecka*, Maria Baranowska

Katedra Mleczarstwa i Zarządzania Jakością,
Wydział Nauki o Żywności,
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

*Kontakt e-mail: marika.bielecka@uwm.edu.pl

Wstęp

Lotne związki organiczne (LZO) obecne w mleku i jego przetworach odgrywają istotną rolę w kształtowaniu cech sensorycznych, wpływając bezpośrednio na zapach, smak oraz akceptację produktów przez konsumentów [11]. To właśnie unikalny profil aromatyczny, wynikający z obecności oraz wzajemnych interakcji różnych grup związków chemicznych, nadaje każdemu wyrobowi mleczarskiemu charakterystyczne cechy sensoryczne [3, 6, 17].

Szczególne znaczenie mają LZO w przypadku produktów fermentowanych, takich jak jogurty, napoje mleczne czy sery, gdzie pod wpływem procesów mikrobiologicznych i enzymatycznych powstają liczne związki zapachowe – w tym aldehydy, ketony, estry, alkohole czy związki siarkowe [5, 13, 14]. Nie mniej istotny jest profil aromatyczny produktów wysokotłuszczowych, takich jak masło czy śmietanka, w których dominują związki rozpuszczalne w lipidach oraz powstające w wyniku lipolizy czy oksydacji tłuszczów [8, 4].

Jakość sensoryczna produktów mleczarskich jest powiązana z obecnością i stężeniem związków lotnych, dlatego ich identyfikacja i ilościowa analiza stanowią istotny element zarówno w badaniach naukowych, jak i w praktyce przemysłowej – m.in. do monitorowania zmian podczas dojrzewania serów, przechowywania wyrobów, a także wykrywania nieprawidłowości i potencjalnych zafałszowań [2, 6, 16].

W ostatnich latach dynamiczny rozwój technik analitycznych – zwłaszcza chromatografii gazowej sprzężonej ze spektrometrią mas (GC-MS – gas chromatography–mass spectrometry), a także coraz doskonalszych metod przygotowania próbek, takich jak mikroekstrakcja do fazy stacjonarnej (SPME – solid phase microextraction), pozwala na precyzyjne badanie związków lotnych w złożonych matrycach żywnościowych, bez konieczności stosowania rozpuszczalników [3, 5, 7]. Tradycyjne metody oceny sensorycznej, oparte na wykorzystaniu ludzkich zmysłów (wzroku, węchu, smaku, dotyku i słuchu) do odbierania i interpretowania wrażeń związanych z ocenianym produktem, choć niezwykle cenne, mają istotne ograniczenia: są czasochłonne, kosztowne oraz podatne na zmienność wyników wynikającą z indywidualnych różnic percepcyjnych, takich jak uwarunkowania fizjologiczne czy tymczasowa utrata węchu i smaku [1, 10]. W świetle tych wyzwań rośnie znaczenie powtarzalnych metod instrumentalnych, które pozwalają na analizę profilu aromatycznego w sposób niezależny od ludzkich zmysłów. Co istotne, integracja danych uzyskanych z analiz chemicznych z wynikami klasycznej oceny sensorycznej pozwala na pełniejsze i bardziej wiarygodne scharakteryzowanie jakości produktu [3, 6].



Celem niniejszego opracowania jest omówienie znaczenia oraz praktycznych możliwości zastosowania nowoczesnych metod oznaczania związków lotnych w mleku i jego przetworach, których wysoka jakość sensoryczna stanowi kluczowy czynnik zadowolenia konsumentów oraz budowania przewagi konkurencyjnej.

Związki lotne a akceptacja konsumentów

Fenomen nieustającego zainteresowania produktami mleczarskimi wynika przede wszystkim z ich wyjątkowej i powszechnie akceptowanej charakterystyki sensorycznej, która obejmuje takie cechy jak wygląd, tekstura, konsystencja, a przede wszystkim smak i zapach, rozumiane łącznie jako smakowość. Złożony profil smakowo-zapachowy, kształtowany przez interakcje pomiędzy licznymi związkami lotnymi a innymi składnikami matrycy mlecznej, odgrywa fundamentalną rolę w akceptacji produktów mlecznych przez konsumentów. Lotne związki organiczne, będące głównymi nośnikami aromatu, determinują zarówno intensywność, jak i charakter zapachu oraz smaku, nadając produktom mleczarskim ich unikalny i rozpoznawalny profil sensoryczny. Związki te, zróżnicowane pod względem chemicznym – w tym aldehydy, ketony, estry, alkohole, związki siarkowe oraz lotne kwasy tłuszczowe – powstają w wyniku szeregu procesów fizykochemicznych i biochemicznych, takich jak fermentacja, lipoliza, proteoliza czy reakcje Maillarda, które mogą zachodzić w trakcie przetwarzania i przechowywania produktów mlecznych. Skład i stężenie LZO zależą nie tylko od rodzaju surowca i zastosowanej technologii, ale również od warunków przechowywania, co czyni kontrolę tych parametrów szczególnie istotną z perspektywy zapewnienia trwałości cech sensorycznych [4, 5, 8].

Wysoka wrażliwość konsumentów na profil aromatyczny sprawia, że nawet niewielkie zmiany w składzie LZO mogą znacząco wpłynąć na akceptację produktu. Związki o korzystnym działaniu sensorycznym wzmacniają jego atrakcyjność, natomiast obecność substancji o charakterze niepożądanym – takich jak produkty utleniania tłuszczów czy daleko posuniętej degradacji białek – może prowadzić do jego odrzucenia [1, 12].

Zależność między stężeniem niepożądanych LZO a percepcją jakości potwierdzają m.in. badania Allothman i wsp. (2023), którzy wykorzystali metodę progu odrzucenia (Rejection Threshold, RJT), aby określić punkt, w którym konsumenci uznają mleko pasteryzowane za nieakceptowalne sensorycznie. Próg ten był skorelowany z obecnością takich związków, jak aldehyd octowy, siarczek dimetylu, 2-butanon czy estry kwasu masłowego, których wzrost stężenia występował równolegle ze wzrostem ogólnej liczby drobnoustrojów powyżej $7,3 \log_{10}$ jtk/mL [1].

W świetle tych ustaleń, systematyczna kontrola profilu sensorycznego i jego stabilności w czasie staje się nieodzownym elementem nie tylko w zapewnieniu jakości produktów mleczarskich, ale także w procesie projektowania nowych wyrobów, zgodnych z oczekiwaniami konsumentów.

Zastosowanie zaawansowanych technik analitycznych w badaniu profilu aromatycznego produktów mleczarskich

Postęp w dziedzinie analityki chemicznej umożliwił zastosowanie zaawansowanych narzędzi do szczegółowego badania profilu aromatycznego produktów mlecznych. Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod w tym zakresie jest chromatografia gazowa sprzężona ze spektrometrią mas (GC-MS), która pozwala na identyfikację oraz ilościowe oznaczenie szerokiego spektrum związków lotnych [5]. Dzięki wysokiej czułości i selektywności, GC-MS stała się standardowym narzędziem w analizie jakości mleka, jogurtów, serów oraz innych przetworów mlecznych.

W połączeniu z techniką ekstrakcji z fazy nadpowierzchniowej (HS – headspace) lub mikroekstrakcji do fazy stacjonarnej z fazy nadpowierzchniowej (HS-SPME), GC-MS umożliwia efektywne badanie złożonych matryc, jakimi są produkty mleczarskie. Szczególnie technika HS-SPME-GC-MS wyróżnia się wysoką czułością, selektywnością oraz zdolnością do jednoczesnego rozdzielania i identyfikacji wielu związków aromatycznych [6]. Zastosowanie różnych typów włókien SPME, pokrytych selektywnymi sorbentami, pozwala na skuteczne wychwytywanie szerokiego zakresu LZO, co umożliwia kompleksową ocenę profilu zapachowego produktów mlecznych. Coraz większe zainteresowanie wzbudza również chromatografia gazowa sprzężona ze spektrometrią mobilności jonów (HS-GC-IMS – headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry) – technika łącząca klasyczny rozdział chromatograficzny z bardzo czułą i szybką detekcją jonów w fazie gazowej. Jej największe zalety to krótki czas analizy,



brak konieczności skomplikowanego przygotowania próbek oraz wysoka czułość, umożliwiająca detekcję również małocząsteczkowych, trudnych do oznaczenia LZO. Dodatkowym atutem jest możliwość prezentacji wyników w formie kolorystycznych „map cieplnych”, co znacząco ułatwia porównywanie próbek i identyfikację różnic smakowo-zapachowych [3].

Warto jednak zauważyć, że HS-GC-IMS zwykle pozwala na wykrycie mniejszej liczby unikalnych związków niż HS-SPME-GC-MS, co wynika z ograniczeń rozdzielczości chromatograficznej i identyfikacji masowej. Na przykład w badaniach nad fermentowanym serem z użyciem grzybów z rodzaju *Monascus* przy wykorzystaniu HS-SPME-GC-MS zidentyfikowano ponad 80 lotnych związków, podczas gdy metodą HS-GC-IMS wykryto jedynie około 34 [19]. Mimo tych ograniczeń, HS-GC-IMS pozostaje niezwykle przydatna, szczególnie w sytuacjach wymagających szybkiej oceny profilu zapachowego, kontroli jakości w czasie rzeczywistym lub monitorowania świeżości czy dojrzałości produktu.

Coraz większe znaczenie zyskują również metody wspomagające organoleptyczną ocenę profilu zapachowego produktów, takie jak olfaktometria gazowa (GC-O – gas chromatography-olfactometry), która łączy klasyczną detekcję chemiczną z analizą zapachową prowadzoną przez wykwalifikowany panel oceniający. Technika ta umożliwia ocenę sensorycznego znaczenia poszczególnych związków lotnych, pozwalając na wyodrębnienie tych, które realnie wpływają na percepcję aromatu produktu. W analizie sensorycznej produktów mleczarskich coraz częściej stosuje się również tzw. elektroniczne nosy (E-nose) oraz elektroniczne języki (E-tongue). Elektroniczny nos to zespół czujników chemicznych reagujących na różne klasy LZO, których sygnały są analizowane przez systemy rozpoznawania wzorców. Umożliwia to całościową ocenę zapachu próbki, bez potrzeby identyfikowania konkretnych związków, tworzących charakterystyczny „aromatyczny odcisk palca”. Z kolei elektroniczny język, inspirowany działaniem ludzkich kubków smakowych, pozwala na ocenę podstawowych smaków, takich jak słodki, słony, gorzki, kwaśny czy umami. Choć terminy takie jak „elektroniczny nos” czy „elektroniczny język” są powszechnie używane, zwraca się uwagę na ich potencjalnie mylący charakter, ponieważ sugerują analogię ze zmysłami człowieka. W rzeczywistości sprzęt ten, mimo inspiracji fizjologią, mierzy wyłącznie właściwości chemiczne (np. stężenia, struktury cząsteczek), a nie percepcję sensoryczną. Dlatego w komunikacji naukowej zaleca się stosowanie bardziej precyzyjnych terminów, takich jak „instrumentalna analiza aromatu”.

Przykładem badań, w których zastosowano opisane uprzednio techniki, jest analiza profilu aromatycznego surowego mleka pochodzącego z różnych regionów Chin [3]. W badaniach tych, równolegle wykorzystano HS-SPME-GC-MS, HS-GC-IMS, elektroniczny nos oraz elektroniczny język. Pozwoliło to nie tylko na wykrycie istotnych różnic pomiędzy próbkami mleka z regionów północnych i południowych, ale także na identyfikację związków charakterystycznych dla konkretnego obszaru geograficznego, takich jak pirydyna, nonanal, furfural czy kwas oktanowy [3]. Takie wielowymiarowe podejście badawcze pogłębia wiedzę na temat wpływu pochodzenia surowca na profil aromatyczny i może być skutecznym narzędziem w procesie weryfikacji autentyczności czy potwierdzenia deklarowanego pochodzenia produktów mleczarskich. Oprócz czynników geograficznych, na profil lotnych związków w mleku wpływają praktyki hodowlane. Badanie Zacometti i in. (2023) wykazało, że mleko zimowe, mimo braku różnic wynikających z systemu żywienia, zawierało więcej tłuszczu, białka i kazeiny, podczas gdy mleko letnie cechowało się wyższym stężeniem mocznika, 2-pentanolu i aldehydów metylowych. Może to wynikać ze zmian w aktywności enzymatycznej (np. lipolitycznej) oraz z utleniania lipidów i aminokwasów, nasilających się w cieplejszym okresie roku [18].

Mleko po udoju jest podatne na wpływ mikroflory – zarówno pożądaney (np. *Lactobacillus* spp.), jak i niepożądaney (np. *Pseudomonas* spp.). Rozwój bakterii psychrotrofowych w trakcie przechowywania mleka w niskiej temperaturze (4°C), może skutkować pogorszeniem cech sensorycznych, np. pojawieniem się zjełczałego zapachu. Badania Li i in. (2022), przeprowadzone z użyciem HS-GC-IMS, wykazały systematyczny wzrost stężeń niektórych związków – m.in. 2-pentanonu i pirydyny – w czasie przechowywania mleka surowego. Związki te zaproponowano



jako markery świeżości mleka, a analiza głównych składowych (PCA – principal component analysis) pozwoliła na rozróżnienie próbek w zależności od gatunku zwierzęcia i czasu przechowywania [12].

Na profil LZO w mleku istotny wpływ wywiera również obróbka termiczna. Yuan i in. (2023) udowodnili, że pasteryzacja mleka w różnych temperaturach (65°C i 135°C) znacząco modyfikuje skład związków lotnych – powodując wzrost zawartości estrów, ketonów i węglowodorów, a jednocześnie obniżenie stężenia kwasów. Do analizy wykorzystano HS-SPME-GC-MS, identyfikując 43 związki lotne, w tym aldehydy, alkohole i fenole. Co istotne, niektóre związki lotne – takie jak γ -dodekalakton czy γ -nonanolakton – zostały powiązane z pożądaną percepcją posmaku mlecznego i smaku słodkiego w produktach mleczarskich [17]. W badaniu Jiang i in. (2024), wykorzystującym metodę dwuwymiarowej chromatografii gazowej połączonej z olfaktometrią i spektrometrią mas z analizą (2D-GC-O-TOF-MS – two-dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometry) oraz ocenę sensoryczną, wykazano, że obecność tych związków koreluje z wyższą oceną hedonistyczną mleka UHT, co wskazuje na ich znaczenie dla postrzeganej jakości produktu [12].

W produktach fermentowanych, takich jak jogurty czy inne fermentowane napoje mleczne oraz sery, profil smakowo-zapachowy kształtowany jest przez złożone procesy mikrobiologiczne i enzymatyczne. Kluczowe znaczenie mają: skład i proporcje poszczególnych mikroorganizmów obecnych w kulturach stosowanych w przetwórstwie mleka, a także warunki dojrzewania i przechowywania. W wyniku fermentacji w jogurtach powstaje unikatowy profil lotnych związków organicznych (VOCs – volatile organic compounds) – takich jak aldehydy, ketony, alkohole, estry i kwasy karboksylowe – które odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu cech sensorycznych. Szczególnie istotną rolę pełni aldehyd octowy, odpowiedzialny za charakterystyczne odczucie sensoryczne określane jako smak i zapach jogurtowy. Jak wykazano w badaniach Dan i in. (2017), zmiana składu mikrobiologicznego znacząco wpływa na końcowy profil smakowo-zapachowy produktu. Do identyfikacji związków lotnych zastosowano technikę HS-SPME-GC-MS, co pozwoliło na dokładne określenie składu lotnych metabolitów w mleku fermentowanym rozdzielnie przez *S. thermophilus* oraz *L. delbrueckii* ssp. *bulgaricus*, jak również łącznie przez te dwa gatunki bakterii. Zidentyfikowano odpowiednio 53, 43 i 32 związki zapachowe, potwierdzając m.in. obecność takich substancji jak kwas octowy, aldehyd octowy, acetoina, 2,3-butanodion, etanol i 1-heptanol [5].

Sery stanowią wyjątkowo złożoną i wdzięczną matrycę do badań nad lotnymi związkami organicznymi, głównie ze względu na ich ogromną różnorodność sensoryczną, wynikającą z procesu dojrzewania. W odróżnieniu od innych produktów mleczarskich, w serach zachodzą wieloetapowe przemiany biochemiczne – takie jak proteoliza, lipoliza oraz fermentacja – które prowadzą do powstawania szerokiego spektrum związków aromatycznych, w tym aldehydów, ketonów, estrów, alkoholi i kwasów karboksylowych. Unikatowe bukiety smakowo-zapachowe serów, uzyskiwane z relatywnie jednorodnego surowca, jakim jest mleko, zostały trafnie opisane przez Juliet Harbutt w *World Cheese Book*: „*Cud sera polega na tym, że chociaż mleko na całym świecie smakuje niemal tak samo, to różnorodność tekstur, smaków i aromatów serów jest niemal nieskończona – i praktycznie każdy ser można wytworzyć w dowolnym miejscu na świecie.*”[10]. To sensoryczne zróżnicowanie, wynikające m.in. z rodzaju użytego mleka, zastosowanej mikroflory, technologii produkcji oraz warunków dojrzewania, czyni sery doskonałym obiektem do zastosowania zaawansowanych technik analitycznych, w celu identyfikacji i charakterystyki lotnych związków organicznych.

Zaawansowane techniki analityczne, takie jak mikroekstrakcja do fazy stałej w fazie nadpowierzchniowej sprzężona z chromatografią gazową i spektrometrią mas oraz olfaktometrią (HS-SPME-GC-O-MS), znajdują coraz szersze zastosowanie w badaniach aromatu serów w różnych stadiach dojrzewania. Przykładowo, de Jesus Filho i in. (2021) zastosowali to podejście wraz z chemometrią do analizy zmian profilu zapachowego brazylijskiego sera Canastra, uzyskując precyzyjną charakterystykę związków lotnych na różnych etapach jego dojrzewania [6].



W celu zwiększenia czułości i rozdzielczości detekcji, w instrumentalnych badaniach sensorycznych wykorzystuje się także techniki nowej generacji, takie jak dwuwymiarowa chromatografia gazowa (GC×GC) oraz spektrometria mas z reakcją przeniesienia protonu (PTR-ToF-MS – Proton-Transfer Reaction Time-of-Flight Mass Spectrometry). Przykładowo, Yang i in. (2025) zastosowali metodę GC×GC-O-TOF-MS do porównania profili aromatycznych mozzarelli z mleka krowiego i bawolego, wykazując istotne różnice wynikające z surowca, co otwiera nowe perspektywy w zakresie wykrywania zafałszowań i potwierdzania autentyczności produktów mlecznych. Capozzi i in. (2020) przeprowadzili podobną analizę dla sera mascarpone, natomiast Sabouri i in. (2023) udowodnili wysoką skuteczność nowych włókien HS-SPME w analizie irańskich serów solankowych i ultrafiltrowanych, wskazując na ich użyteczność w szybkim i selektywnym oznaczaniu kluczowych LZO [2,15].

Wśród krajowych przykładów szczególne miejsce zajmuje ser pleśniowy Lazur, który – dzięki swojemu wyrazistemu i złożonemu profilowi aromatycznemu – stał się przedmiotem zaawansowanych badań chemiczno-sensorycznych prowadzonych przez zespół z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu pod kierunkiem prof. Henryka Jelenia [13]. W badaniach tych zastosowano połączenie dwóch technik ekstrakcji substancji lotnych: SAFE (solvent-assisted flavour evaporation) oraz HS-SPME, w połączeniu z chromatografią gazową sprzężoną z olfaktometrią (GC-O). Umożliwiło to identyfikację aż 17 związków zapachowo-aktywnych, spośród których największe znaczenie sensoryczne miały m.in. metanotiol, kwas 2(3)-metylobutanowy, 3-(metylotio)propanal, 2,3-butanodion (diacetyl). Badania nad serem Lazur stanowią znakomity przykład zintegrowanej analizy chemiczno-sensorycznej, pokazując jednocześnie, że polskie produkty mleczarskie mogą być wartościowym modelem badawczym w kontekście badania związków lotnych i oceny jakości serów dojrzewających [13]. Ten sam zespół badawczy zajął się również charakterystyką Oscypka – tradycyjnego, wędzonego sera owczego o wyrazistym profilu smakowo-zapachowym. Jak wykazali Majcher i in. (2011), proces technologiczny, obejmujący krzepnięcie, parzenie, peklowanie i wędzenie, prowadzi do powstania złożonego profilu 54 związków lotnych (m.in. estry, ketony, furany, fenole), z czego kluczowy wpływ na finalny aromat Oscypka ma etap wędzenia [14].

Coraz większe zainteresowanie naukowców budzą również wysokotłuszczowe produkty mleczne, takie jak masło czy śmietana, których profil aromatyczny kształtowany jest głównie przez związki lotne rozpuszczalne w tłuszczach, powstające m.in. w wyniku lipolizy enzymatycznej i oksydacji lipidów podczas przechowywania lub obróbki cieplnej. Kwasy tłuszczowe, aldehydy oraz ketony odgrywają tu kluczową rolę, a nowoczesne techniki analityczne, takie jak HS-SPME-GC-MS, umożliwiają ich dokładną identyfikację. Zróżnicowanie profili zapachowych, w zależności od technologii i rodzaju surowca, potwierdzają badania nad produktami takimi jak ghee czy tłuszcz mleczny bezwodny. Mimo rosnącej liczby badań, wciąż brakuje całościowego ujęcia mechanizmów powstawania aromatów w tej grupie produktów, które pozwoliłoby na skuteczniejsze kształtowanie ich cech sensorycznych [8].

Podsumowanie

Współczesny przemysł mleczarski zmagą się z rosnącymi wymaganiami konsumentów dotyczącymi jakości, autentyczności i stabilności sensorycznej produktów. W tym kontekście lotne związki organiczne stają się nie tylko wskaźnikiem świeżości, ale także kluczowym elementem kształtującym profil smakowo-zapachowy mleczarskich wyrobów fermentowanych, dojrzewających i wysokotłuszczowych.

W artykule przedstawiono zintegrowane podejście do badania LZO w trzech głównych grupach produktów: jogurtach, serach oraz produktach takich jak śmietana, masło czy mleko w proszku. Każda z tych kategorii charakteryzuje się odmiennym mechanizmem powstawania związków aromatycznych – od fermentacji i aktywności mikroorganizmów w jogurtach, przez zaawansowaną proteolizę i lipolizę zachodzącą podczas dojrzewania serów, aż po reakcje utleniania i degradacji lipidów typowe dla produktów wysokotłuszczowych. Zastosowanie zaawansowanych technik analitycznych, takich jak HS-SPME-GC-MS, GC-O, GC×GC, PTR-ToF-MS czy HS-GC-IMS, umożliwia precyzyjne oznaczanie tych związków oraz ich powiązanie z percepcją sensoryczną. Coraz częściej analizy instrumentalne wspierane są narzędziami chemometrycznymi i sensorycznymi, pozwalając nie tylko na klasyfikację



produktów i ocenę jakości, ale również na wykrywanie zafałszowań i niepożądanych zmian aromatu.

Zarówno badania międzynarodowe, jak i krajowe jednoznacznie wskazują na rosnący potencjał chemiczno-sensorycznego podejścia w ocenie jakości produktów mleczarskich, w tym zarówno regionalnych wyrobów rzemieślniczych, jak i produktów przemysłowych. Szczególne znaczenie zyskują analizy związków lotnych w serach oraz fermentowanych i wysokotłuszczowych produktach mlecznych, których profil aromatyczny stanowi istotny element jakości sensorycznej oraz autentyczności.

Jednocześnie obserwowany wzrost liczby prac poświęconych profilom lotnym produktów mleczarskich, podkreśla potrzebę dalszego pogłębiania wiedzy na temat mechanizmów powstawania i stabilności ich aromatów. Ma to bezpośrednie przełożenie na możliwości technologicznej optymalizacji tych produktów oraz doskonalenia ich właściwości sensorycznych.

Literatura

1. Alothman M., Bremer P.J., Lusk K., Silcock P. (2023). When does milk spoil? The use of rejection threshold methodology to investigate the influence of total microbial numbers on the acceptability of fresh chilled pasteurised milk. *Beverages*, 9(2), 53.
2. Capozzi V., Lonzarich V., Khomenko I., Cappellin L., Navarini L., Biasioli F. (2020). Unveiling the molecular basis of mascarpone cheese aroma: VOCs analysis by SPME-GC/MS and PTR-ToF-MS. *Molecules*, 25(5), 1242.
3. Chi X., Zhang Y., Zheng N., Wang J., Liu H. (2024). HS-GC-IMS and HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose and E-tongue reveal the flavors of raw milk from different regions of China. *Current Research in Food Science*, 8, 100673.
4. Clarke H.J., Griffin C., Rai D.K., O'Callaghan T.F., O'Sullivan M.G., Kerry J.P., Kilcawley K.N. (2019). Dietary compounds influencing the sensorial, volatile and phytochemical properties of bovine milk. *Molecules*, 25(1), 26.
5. Dan T., Wang D., Jin R.L., Zhang H.P., Zhou T.T., Sun T.S. (2017). Characterization of volatile compounds in fermented milk using solid-phase microextraction methods coupled with gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Dairy Science*, 100(4), 2488-2500.
6. de Jesus Filho M., Klein B., Wagner R., Godoy H.T. (2021). Key aroma compounds of Canastra cheese: HS-SPME optimization assisted by olfactometry and chemometrics. *Food Research International*, 150, 110788.
7. Delgado F.J., González-Crespo J., Cava R., Ramírez R. (2011). Formation of the aroma of a raw goat milk cheese during maturation analysed by SPME-GC-MS. *Food Chemistry*, 129(3), 1156-1163.
8. Elbarbary A., Jin J., Li K., Golshany H., Seddiek A.S., Bakry I.A., Wang X. (2025). Understanding the flavor dynamics of high-fat dairy products: Insights into mechanisms, aroma profiles, and sensory evaluation. *Food Research International*, 116504.
9. Ertekin M., Uğurlu Ö., Salum P., Erbay Z. (2023). Effects of milk types used in Antep cheese production on some cheese organoleptic quality parameters and brine composition during 5-month ripening. *Journal of Food Science*, 88(4), 1445-1465.
10. Harbutt J. (2015). *World cheese book*. Dorling Kindersley Ltd.
11. Jiang K., Yang A., Zhang Z., Xu K., Kuang H., Meng F., Wang B. (2024). Identification of aroma-active compounds in milk by 2-dimensional gas chromatography-olfactometry-time-of-flight mass spectrometry combined with check-all-that-apply questions. *Journal of Dairy Science*, 107(11), 9124-9134.



12. Li H., Xi B., Yang X., Wang H., He X., Li W., Gao Y. (2022). Evaluation of change in quality indices and volatile flavor components in raw milk during refrigerated storage. LWT, 165, 113674.
13. Majcher M.A., Myszk K., Gracka A., Grygier A., Jeleń H.H. (2017). Key odorants of lazur, a Polish mold-ripened cheese. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(10), 2443-2448.
14. Majcher M.A., Goderska K., Pikul J., Jeleń H.H. (2011). Changes in volatile, sensory and microbial profiles during preparation of smoked ewe cheese. Journal of the Science of Food and Agriculture, 91(8), 1416-1423.
15. Sabouri N., Yamini Y., Ehsani M.R., Bakhoda H. (2024). Determination of volatile compounds in white brine cheese and ultrafiltered cheese during ripening and shelf-life using nano-adsorbent fibers. Journal of Food Science and Technology, 61(3), 573-584.
16. Yang Z., Wang J., Wang B., Cao Y. (2025). Characterization of volatile compounds in mozzarella cheeses made from bovine and buffalo milk by different aroma extraction and identification methods. Journal of Dairy Science, 108(4), 3214-3233.
17. Yuan N., Chi X., Ye Q., Liu H., Zheng N. (2023). Analysis of volatile organic compounds in milk during heat treatment based on E-nose, E-tongue and HS-SPME-GC-MS. Foods, 12(5), 1071.
18. Zacometti C., Tata A., Massaro A., Riuzzi G., Bragolusi M., Cozzi G., Segato S. (2023). Seasonal variation in raw milk VOC profile within intensive feeding systems. Foods, 12(9), 1871.
19. Zhang Q., Wang Y., Meng F., Wang B., Wang Y. (2024). Comparative analysis of the volatile flavor compounds of Monascus-fermented cheese with different ripening periods by SPME-GC-MS, SPME-GC×GC-MS, and HS-GC-IMS. Food Bioscience, 62, 105045.