



Przyjaciół czy intruz? Dualistyczna natura biofilmów w przetwórstwie mleka

Katarzyna Czaczyk

Katedra Biotechnologii i Mikrobiologii Żywności, Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

katarzyna.czaczyk@up.poznan.pl

Zakładamy przemysł mleczarski, ze względu na specyfikę surowca bogatego w białka, tłuszcze i cukry, stanowią unikalny ekosystem dla mikroorganizmów. W środowisku tym bakterie rzadko występują w formie wolno żyjących komórek, znacznie częściej tworzą złożone struktury zwane biofilmami [12]. Biofilmy definiowane są obecnie jako wielokomórkowe struktury drobnoustrojów otoczone warstwą substancji organicznych i nieorganicznych, produkowanych przez te mikroorganizmy, wykazujące adhezję do powierzchni biologicznych i/lub abiotycznych. Tworzenie biofilmu rozpoczyna się od przyczepienia do powierzchni pojedynczych komórek. Główną rolę odgrywają tutaj oddziaływania fizyczne, powodujące przemieszczanie się drobnoustrojów ze środowiska płynnego w kierunku powierzchni nośnika. Ten etap nazywany jest adhezją niespecyficzną (początkową). Adhezja specyficzna to głównie oddziaływania mikrobiologiczne, takie jak produkcja zewnątrzkomórkowych egzopolimerów (tzw. macierzy zewnątrzkomórkowej), zmiany metaboliczne i genetyczne oraz tworzenie agregatów komórkowych. Rozpoczyna się namnażanie przyczepionych mikroorganizmów. Tworzy się w ten sposób trójwymiarowa struktura unieruchomionych komórek, która modelowana jest przez siły hydrodynamiczne całego układu [4]. Zatem biofilm to nie tylko przypadkowe skupisko drobnoustrojów, lecz wysoce zorganizowana mikrostruktura, osadzona w ochronnej macierzy zewnątrzkomórkowej, która czyni go jednym z najtrudniejszych wyzwań współczesnej higieny produkcji.

Przez dekady biofilmy postrzegano niemal wyłącznie przez pryzmat zagrożeń. W przemyśle spożywczym mikrobiologiczne zanieczyszczenie powierzchni kontaktujących się z żywnością może być przyczyną skażenia drobnoustrojami, powodującymi psucie żywności i/lub groźnymi patogenami, takimi jak *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* sp., *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* czy *Cronobacter sakazakii* [3, 8]. Ich obecność na liniach technologicznych generuje także wymierne straty ekonomiczne. Tworząc się na elementach ruchomych maszyn powodują wzrost sił tarcia, a także utrudniają transfer ciepła na wymiennikach.



Niektóre bakterie w biofilmach wytwarzają kwasy organiczne, co powoduje przyspieszoną korozję stali nierdzewnej i skraca żywotność maszyn. Poważne zagrożenia stanowią też biofilmy tworzące się w rurach. Pod wpływem przepływu mleka fragmenty biofilmu mogą odrywać się, zanieczyszczając sterylne produkty, co może powodować konieczność wycofania całych partii towaru z rynku [6]. Macierz zewnątrzkomórkowa biofilmu chroni drobnoustroje przed działaniem środków dezynfekcyjnych, detergentów oraz dezynfekcją termiczną. Ma to istotne znaczenie dla utrzymania higieny i przyczynia się do nieefektywności procesów mycia i dezynfekcji. W tym ujęciu biofilm jest „niewidzialnym wrogiem”, którego eliminacja staje się priorytetem każdego zakładu, w tym również zakładów przemysłu mleczarskiego [2].

Jednak współczesna mikrobiologia żywności coraz wyraźniej dostrzega drugie oblicze zjawiska tworzenia się biofilmów. Jest to szczególnie widoczne w przemyśle mleczarskim. Bakterie fermentacji mlekowej (ang. lactic acid bacteria – LAB) są szeroko wykorzystywane do produkcji fermentowanych produktów mleczarskich. LAB, należące do rodzajów *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Streptococcus* czy *Leuconostoc*, pełnią istotną rolę w kształtowaniu tekstury, właściwości smakowo-zapachowych i odżywczych produktów, takich jak kwaśne mleko, jogurt czy sery. Znane jest również antagonistyczne oddziaływanie LAB w stosunku do drobnoustrojów patogennych, co związane jest z produkcją związków takich jak bakteriocyny, kwasy organiczne czy nadtlenek wodoru. Wykazano, że LAB wyizolowane z produktów mleczarskich są zdolne do tworzenia biofilmów. Dotyczy to zwłaszcza bakterii należących do gatunków *Lactococcus*, *Lactocaseibacillus*, *Lactiplantibacillus* czy *Limosilactobacillus*. Jeśli więc powierzchnia zasiedlona zostanie przez „dobre bakterie” LAB, utworzą one biofilm, który będzie oddziaływał jak tarcza ochronna. Dzięki kolonizacji powierzchni przez LAB, drobnoustroje patogene nie są w stanie się zakotwiczyć. Jest to naturalny system obronny, znacznie skuteczniejszy niż dezynfekcja chemiczna, która przygotowuje powierzchnię pod szybką rekolonizację przez inne szczepy. Interakcje pomiędzy biofilmami utworzonymi przez LAB a biofilmami formowanymi przez mikroorganizmy chorobotwórcze mają istotne znaczenie dla bezpieczeństwa i jakości produktów mleczarskich [11]. LAB mogą hamować tworzenie biofilmu przez drobnoustroje patogene lub współtworzyć taki biofilm. Zależy to od różnych czynników, takich jak specyfika szczepów, warunki środowiskowe czy współzawodnictwo mikroorganizmów. LAB, w szczególności szczepy należące do rodzajów *Lactobacillus* i *Lactococcus*, są szeroko znane nie tylko ze swojej technologicznej roli jako składników kultur starterowych, ale również ze swojego antagonistycznego oddziaływania wobec drobnoustrojów patogennych, szczególnie w biofilmie. Zdolność LAB do produkcji kwasów organicznych (np. kwas mlekowy, kwas octowy), bakteriocyn (np. nizyna, laktacyna Q, sakacyna) czy biosurfaktantów skutecznie hamuje zdolność do adhezji i tworzenia biofilmów przez bakterie patogene, takie jak *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* sp., *Escherichia coli* O157:H7 czy *Staphylococcus aureus*. Wykazano także, że biofilm utworzony na powierzchni stali nierdzewnej przez *Lactococcus lactis* i *Lactobacillus sakei* skutecznie redukuje liczbę komórek *Listeria monocytogenes* w środowisku produkcyjnym w przemyśle mleczarskim [7]. Dalsze badania nad tworzeniem biofilmów przez LAB i ich interakcjami z bakteriami patogennymi pozwolą na rozwój strategii biokontroli i wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań w przemyśle mleczarskim, co może poprawić jakość produktów mlecznych.



W tradycyjnym serowarstwie biofilmy tworzone przez pożyteczne LAB pełnią rolę naturalnej bariery ochronnej i biologicznego katalizatora. Zasadlając powierzchnie drewnianych desek czy narzędzi, pożyteczna mikroflora stosuje strategię wykluczenia konkurencyjnego, uniemożliwiając szczepom chorobotwórczym kolonizację tych samych powierzchni. Pożyteczne biofilmy LAB, zasiedlające drewniane półki przechowalni serów, fizycznie zajmują miejsce i nie pozwalają na kolonizację tych powierzchni przez *Listeria monocytogenes*, która stanowi duże zagrożenie w przemyśle mleczarskim. W niektórych krajach (np. we Francji czy Włoszech) stosowanie tradycyjnych drewnianych narzędzi, na których bytuje stabilny, pożyteczny biofilm LAB, jest chronione prawnie jako element dziedzictwa kulinarnego [1, 5].

Biofilmy tworzone przez LAB mają wpływ na właściwości organoleptyczne tradycyjnych produktów mleczarskich. Jedną z najbardziej znaczących właściwości LAB jest ich zdolność do degradacji białek, takich jak np. kazeina, co może obniżać alergenicność produktów mleczarskich. Szczepy izolowane z fermentowanych produktów mleczarskich i serów syntetyzują enzymy proteolityczne, które powodują hydrolizę kazeiny kształtując strukturę sera. Zdolność do syntezy enzymów proteolitycznych przez te bakterie skutkuje także powstawaniem krótszych peptydów i aminokwasów, które są prekursorami związków smakowo-zapachowych. Dodatkowo poprawiają one także jędrność i elastyczność sera. Biofilmy LAB odgrywają także znaczącą rolę w tworzeniu związków lotnych, takich jak aldehyd octowy, acetoina, diacetyl czy butanodiol, które nadają mlecznym produktom fermentowanym wyrazisty smak i zapach. Biofilmy tworzące skórkę serów (np. maziowych czy pleśniowych) uwalniają enzymy (proteazy i lipazy), które wnikają w głąb sera, rozkładając białka i tłuszcze na prostsze związki (peptydy, aminokwasy, kwasy tłuszczowe). To właśnie te produkty rozpadu odpowiadają za charakterystyczny smak, zapach i kremową konsystencję tych serów [11]. Oprócz LAB na powierzchni serów występuje także duża różnorodność bakterii gramujemnych (zwłaszcza na powierzchni serów dojrzewających). Na skórcie sera dominuje kilka specyficznych rodzajów, które przystosowały się do zasolonego i bogatego w białka środowiska. Na serach typu brie i camembert często występują bakterie należące do rodzaju *Psychrobacter*, które są odporne na niskie temperatury i duże stężenia soli. W solankach i na powierzchni serów twardych pojawiają się halotolerancyjny rodzaj *Halomonas*. Z serów rzemieślniczych często izolowane są bakterie z rodzaju *Pseudoalteromonas*. Nawet rodzaje takie jak *Proteus* i *Morganella*, choć często kojarzone są z psuciem żywności, w kontrolowanych warunkach serowarskich uczestniczą w rozkładzie aminokwasów. Co więcej, aktywność enzymatyczna tych kultur jest kluczowa dla procesów proteolizy i lipolizy, nadając serom ich unikalny bukiet smakowo-zapachowy. W wyniku tych procesów tworzone są np. lotne związki siarki, które nadają serom maziowym charakterystyczny „czosnkowy” lub „cebulowy” zapach. Wydzielany jest amoniak, powodujący podwyższenie pH powierzchni serów, co pozwala na rozwój innych pożądanych kultur (np. *Brevibacterium linens*), który nadaje serom maziowym charakterystyczne czerwone zabarwienie i aromat. Bakterie *Brevibacterium linens* kształtują charakterystyczny smak i zapach serów takich jak Romadour, Limburger, Gruyère i Brick. Niektóre szczepy bakterii gramujemnych tworzących skórkę sera są zdolne do syntezy barwników (żółtych, pomarańczowych, a nawet brązowych), które współtworzą naturalną paletę barw skórki sera, chroniąc go jednocześnie przed światłem i utlenianiem. Warto zauważyć, że populacja bakterii Gram-ujemnych w serach podlega sukcesji mikrobiologicznej.



We wczesnych fazach dojrzewania serów, tuż po zasoleniu, gdy pH jest niskie dominują drożdże (np. *Debaromyces hansenii*). Wzrost pH stwarza korzystne środowisko do rozwoju bakterii Gram-ujemnych, które z kolei przygotowują grunt dla bakterii Gram-dodatnich. W niektórych tradycyjnych serach francuskich bakterie Gram-ujemne mogą stanowić nawet 30-50% całej mikrobioty powierzchniowej, co czyni je równie ważnymi jak LAB. Współczesna mikrobiologia żywności zmienia podejście do tych organizmów. Dawniej większość bakterii Gram-ujemnych traktowano wyłącznie jako wskaźnik braku higieny. Dziś wiemy, że większość gatunków z rodzajów *Psychrobacter* czy *Halomonas* jest całkowicie nieszkodliwa i kluczowa dla jakości sensorycznej serów [1, 11]. Oczywiście, w tej grupie znajdują się też niepożądane bakterie, jak *Salmonella* czy szczepy *Escherichia coli*, dlatego monitoring mikrobiologiczny pozostaje niezbędny.

Przemysł mleczarski musi zrezygnować z uniwersalnego podejścia do biofilmów. W strefach krytycznych (rury, wymienniki ciepła, pompy) priorytetem jest destrukcja biofilmów przy użyciu metod fizycznych, chemicznych, enzymatycznych lub biologicznych [9]. Natomiast w strefach dojrzewania serów konieczne jest utrzymanie stabilnych, pożytecznych konsorcjów mikrobiologicznych. Należałoby uznać zjawisko wykluczenia konkurencyjnego za metodę wspomagającą bezpieczeństwo produktów mleczarskich. Zrozumienie dynamiki pożytecznych biofilmów może prowadzić do rozwoju technik tzw. "biokontroli", w których celowo zasiedla się powierzchnie bezpiecznymi szczepami bakterii, blokując tym samym niszę ekologiczną dla mikroorganizmów patogennych. Trzeba zdać sobie sprawę, że standardowe metody mikrobiologiczne oparte na posiewach mogą być niewystarczające do oceny biofilmów w skali przemysłowej. Konieczne jest wdrożenie nowoczesnych metod kontrolujących aktywność drobnoustrojów w biofilmie w czasie rzeczywistym. Pozwoliłoby to na szybką reakcję w przypadku pojawienia się sygnałów o obecności drobnoustrojów patogennych w środowisku produkcyjnym [10, 13, 14]. Konieczna jest zmiana i uświadomienie sobie, że dążenie do pełnej sterylności w całym zakładzie jest często nieefektywne ekonomicznie i biologicznie ryzykowne. Zamiast tego, należy promować strategię „kontrolowanego ekosystemu”, w którym jakość produktu jest chroniona poprzez zarządzanie sukcesją mikrobiologiczną na powierzchniach użytkowych w zakładzie mleczarskim. Celem niniejszej pracy była analiza tej dualistycznej natury biofilmów w sektorze mleczarskim. Podjęto próbę odpowiedzi na pytanie: gdzie przebiega granica między koniecznością bezwzględnej sterylizacji a potencjałem płynącym z kontrolowanej kolonizacji biologicznej? Zrozumienie dynamiki tych mikrostruktur jest bowiem kluczem nie tylko do zapewnienia bezpieczeństwa konsumentów, ale i do zachowania bioróżnorodności oraz autentyczności produktów mleczarskich w dobie globalizacji przemysłu spożywczego.



Literatura

1. Beresford T., Fitzsimons N., Brennan O., Cogan T. (2001). Recent advances in cheese microbiology. *International Dairy Journal*, 11(4-7), 259-274
2. Brooks J.D., Flint S.H. (2008). Biofilms in the food industry: problems and the potential for understanding control. *International Journal of Food Microbiology*, 124(1), 1-7
3. Carpentier B., Cerf O. (2011). Review—Persistence of *Listeria monocytogenes* in food industry equipment and premises. *International Journal of Food Microbiology*, 145(1), 1-8
4. Czaczyk K. (2004). Czynniki warunkujące adhezję do powierzchni abiotycznych. *Postępy Mikrobiologii*, 43(3), 267-283
5. Dec B., (2025). Ser jako żywy ekosystem – fascynujące dojrzewanie sera Fiore Sardo. *Przegląd Mleczarski*, 11, 38
6. Desmousseaux C., Guilbaud M., Jard G., Tormo H., Oulahal N., Hanin A., Bourdonnais E., Jha P.K., Laithier C. (2024). Biofilm formation in dairy: a food safety concern – biofilms in the milking machine, from laboratory scale to on-farm results. *Journal of Dairy Science*, 108, 8120-8140
7. Di Ciccio P., Rubiola S., Paebianco F., Lomonaco S., Allard M., Bianchi D.M., Civera T., Chiesa F. (2022). Biofilm formation and genomic features of *Listeria monocytogenes* strains isolated from meat and dairy industries located in Piedmont (Italy). *International Journal of Food Microbiology*, 378, 109784
8. Gagnon M., Jean S., de Toro-Martin J., LaPointe G., Guévremont É., Dufour S., Roy D. (2025). Biofilm formation in dairy: a food safety concern – insights into the prevalence of *Pseudomonadota* and yeasts on milking system surface biofilms. *Journal of Dairy Science*, 108, 8141-8156
9. Goetz C., Sanschagrin L., Jubinville E., Jacques M., Jean J. (2024). Biofilm formation in dairy: a food safety concern – recent progress in antibiofilm strategies in the dairy industry. *Journal of Dairy Science*, 108, 8157-8175
10. LaPointe G., Wilson T., Tarrah A., Gagnon M., Roy D. (2025) Biofilm formation in dairy: a food safety concern – microbial community tracking from dairy farm to factory; Insight on biofilm management for enhanced food safety and quality. *Journal of Dairy Science*, 108, 8101-8119
11. Marković K.G., Grujović M.Ž., Stefanović O.D. (2025). Biofilms in dairy products: safety hazard or beneficial asset? *International Dairy Journal*, 171, 106381
12. Roy D., Gagnon M. (2025). Biofilm formation in dairy: a food safety concern – introduction. *Journal of Dairy Science*, 108, 8098-8100
13. Srey S., Jahid I.K., Ha S.D. (2013). Biofilm formation in food industries: A food safety concern. *Food Control*, 31(2), 572-585
14. Yuan L., Dai H., He G., Yang Z., Jiao X. (2023). Invited review: current perspectives for analysing the dairy biofilms by integrated multiomics. *Journal of Dairy Science*, 106, 8181-8192