

PROBİYOTİK, STARTER KÜLTÜR VE BAKTERİYOFAJLARDA MİKROENKAPSÜLASYON TEKNİKLERİNİN KULLANIMI VE GÜNCEL GIDA UYGULAMALARI

Şeyma Betül ENCU*, Esra ACAR SOYKUT, İbrahim ÇAKIR

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye

Geliş / Received 09.09.2025; Kabul / Accepted: 10.10.2025; Online baskı / Published online: 13.10.2025

Encu, Ş. B., Acar Soykut, E., Çakır, İ. (2025). Probiyotik, starter kültür ve bakteriyofajlarda mikroenkapsülasyon tekniklerinin kullanımı ve güncel gıda uygulamaları. GIDA (2025) 50 (5) 929-945 doi: 10.15237/ gida.GD25119

Encu, Ş. B., Acar Soykut, E., Çakır, İ. (2025). Use of microencapsulation techniques in probiotics, starter cultures and bacteriophages and current food applications. GIDA (2025) 50 (5) 929-945 doi: 10.15237/ gida.GD25119

ÖZ

Mikroenkapsülasyon; katı, sıvı veya gaz formundaki aktif bir maddenin bir veya birden fazla kaplama materyali ile kaplanmasını sağlayan teknolojidir. Bu teknoloji sayesinde mikroorganizmalar çevresel stres faktörlerine karşı korunabilir, canlılıklarını daha uzun süre sürdürebilir ve hedeflenen bölgelerde kontrollü olarak salınabilir. Günümüzde, tüketici tercihlerindeki değişim ve sağlık odaklı gıda taleplerinin artmasıyla birlikte, probiyotiklerin çeşitli gıda matrislerine entegrasyonu yaygınlaşmıştır. Bununla birlikte, patojen mikroorganizmalara karşı biyolojik ajan olarak kullanılan bakteriyofajların da gıdalarda ve gıda ambalajlarında kullanımı, güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, probiyotikler ve starter kültürler gibi faydalı mikroorganizmaların yanı sıra, fajların da gıdalarda kontrollü kullanımı ve mikrobiyal stabilitenin sağlanması, gıda endüstrisi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu mikroorganizmaların gıda içerisinde ve sindirim sistemi boyunca canlılıklarının korunması; ürünlerin aroma, tekstür ve raf ömrü gibi duyu ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi; fonksiyonel bileşenlerin stabilitesinin sağlanması ve farklı metabolitlerle kombinasyonlarıyla yeni ürünlerin geliştirilmesi mikroenkapsülasyon teknikleri ile mümkün olmaktadır. Bu derlemenin amacı fajlar, probiyotikler ve starter kültürlerin mikroenkapsülasyon teknikleri ile korunmasını ve bu teknolojinin gıda endüstrisindeki uygulamalarını inceleyerek, potansiyel faydalarını ortaya koymaktır.

Anahtar kelimeler: Mikroenkapsülasyon, probiyotik, bakteriyofaj

USE OF MICROENCAPSULATION TECHNIQUES IN PROBIOTICS, STARTER CULTURES AND BACTERIOPHAGES AND CURRENT FOOD APPLICATIONS

ABSTRACT

Microencapsulation is a technology that allows an active ingredient in solid, liquid, or gaseous form to be coated with one or more coating materials. This technology protects microorganisms from environmental stress factors, maintains their viability for longer periods, and allows for controlled release in targeted areas. With changing consumer preferences and increasing demands for health-focused foods, the integration of probiotics into various food matrices has become widespread.

* Sorumlu yazar / Corresponding author:

✉: betulkulogl@hotmail.com

☎: (+90) 374 254 10 00 / 5848

Şeyma Betül Encu; ORCID no: 0000-0001-9155-1868

Esra Acar Soykut; ORCID no: 0000-0002-6639-4212

İbrahim Çakır; ORCID no: 0000-0001-7775-1871

Furthermore, the use of bacteriophages, used as biological agents against pathogenic microorganisms, in foods and food packaging is among the current research topics. In this context, the controlled use of phages in foods and ensuring microbial stability, in addition to beneficial microorganisms such as probiotics and starter cultures, is of great importance to the food industry. Preserving the viability of these microorganisms in food and throughout the digestive tract; improving the sensory and physical properties of products, such as aroma, texture, and shelf life; ensuring the stability of functional ingredients; and developing new products by combining them with different metabolites are all possible through microencapsulation techniques. The aim of this review is to examine the preservation of phages, probiotics and starter cultures by microencapsulation techniques and the applications of this technology in the food industry and to reveal its potential benefits.

Keywords: Microencapsulation, probiotic, bacteriophage

GİRİŞ

Mikroenkapsülasyon tekniği; gıda bileşenleri, biyoaktif bileşikler, enzimler, canlı hücreler veya diğer materyallerin kapsül içerisine hapsedilmesi işlemidir. Tıp, ilaç, tarım, kozmetik, kimya, tekstil ve gıda endüstrisi gibi birçok alanda kullanımı söz konusudur (Niamah vd., 2021). Bu teknik, bileşenleri ısı, ışık, nem, oksijen gibi çevresel etkenlerden koruyarak stabilitelerini ve biyoyararlanımlarını artırmak ve kontrollü salınımını sağlamak için kullanılmaktadır (Emon vd., 2025). Koruyucu özelliğinin ötesinde, gıda ve ilaçlardaki aktif bileşenlerin acı tadını ve istenmeyen kokuları maskelemek; elektronik mürekkep, yapıştırıcı, böcek ilacı, pigment ve enzim üretiminde de kullanılabilir (Lalarukh vd., 2025; Wang vd., 2025).

Mikrokapsül üretimi 1930'larda başlamış ve 1970'lerde hızla artmıştır. Mikrokapsüllerin ilk pazara sunulan uygulaması, 1957'de ABD'de National Cash Register tarafından patenti alınan karbonsuz fotokopi kağıdı olmuştur (Fanger, 1974). Daha sonraları teknik daha da geliştirilerek ilaç, tarım, gıda ve kozmetik gibi alanlara yayılmıştır. Mikrokapsülleme tekniği ile oluşturulan mikropartiküllerin boyutu 1 µm ile birkaç milimetre arasında değişmektedir. Mikrokapsül, aktif maddeyi içeren çekirdek ve çekirdeği saran kapsülleme/kaplama materyalinden oluşur. Son parçacık boyutu, işleme yöntemi ve kapsülleme malzemesi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, mikrokapsülün işlevine, hedefine ve istenen parçacık boyutuna göre belirli bir kapsülleme işlemiyle birlikte kullanılacak kaplama malzemesinin türü dikkate alınmalıdır. Kaplama malzemesi ayrıca kapsülleme verimliliği ve stabilite için de önemlidir (Calderón-

Oliver ve Ponce-Alquicira, 2022). Parçacık boyutu 1 µm'nin altında olduğunda oluşan partikül ise nanopartikül olarak adlandırılmaktadır. Nano kapsülleme, biyoaktif bileşiklerin moleküler düzeyde çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını artırarak bozulmaya karşı üstün koruma sağlar. Ancak nano kapsülleme, yüksek üretim maliyetleri, tutarlı partikül boyutu ve dağılımını korumada teknik zorluklar gibi olumsuzluklar barındırır (Srivastava vd., 2024).

Mikrokapsülün morfolojisi, çekirdek malzemesine ve kaplama malzemesinin toplanma işlemine bağlıdır. Morfolojisine göre kapsüller mononükleer, polinükleer ve matris olarak ayrılabilir. Mononükleer kapsüller, çekirdeğin etrafında bir dış kabuk içerir. Polinükleer kapsüller bir kabuğa hapsolmuş birçok çekirdeğe sahiptir. Matris kapsüller ise çekirdek malzemesinin kabuk malzemesi içerisinde düzgün dağılması ile oluşur. Ayrıca, çok kabuklu mononükleer bir kapsül veya küresel olmayan/düzensiz şekilli bir kapsül oluşumu da mümkündür (Saifullah vd., 2019).

Mikroenkapsülasyon tekniği, gıda endüstrisinde hassas bileşenlerin korunması (de Melo vd., 2022, Ştefănescu vd., 2022), kontrollü salınımı (Ramirez-Olea vd., 2024; Browning vd., 2025) ve fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesi (Barro vd., 2024) amacıyla araştırılmaktadır. Bu derlemede, probiyotikler, starter kültürler ve bakteriyofajlarda mikroenkapsülasyon işlemi, kullanılan başlıca teknikler ve gıda teknolojisinde uygulamaları ele alınmıştır.

MİKROENKAPSÜLASYON İŞLEMİNDE KULLANILAN TEMEL YÖNTEMLER

Mikro kapsülleme teknikleri kimyasal, fiziko-kimyasal ve fiziko-mekanik yöntemler olarak gruplandırılabilir (Jyothi vd., 2010). Kullanılan temel yöntemler arasında sprey kurutma, dondurarak kurutma, emülsifikasyon, ekstrüzyon ve koaservasyon yer almaktadır.

Sprey kurutmada, sıvılar genellikle hava olan ısıtılmış bir kurutma gazı ortamına bir atomizer ile püskürtülür, püskürtme damlacıkları kurutma bölgesinde buharlaşır. Daha sonra katı ürün siklon separatör vasıtasıyla hava akımından alınarak toplanır. Püskürtmeli kurutma, hücreleri strese karşı daha dayanıklı hale getirerek, yüksek ısı, asidik ortam veya safra tuzlarının varlığı gibi zorlu koşullara dayanımını sağlar (Srivastava vd., 2024). Sprey kurutmada yaygın olarak kullanılan kaplama malzemeleri arasında gam arabik, siklodekstrinler ve farklı dekstroz eşdeğerlerine sahip maltodekstrinler gibi polisakkaritler (Mahdi vd., 2020) ve peynir altı suyu proteinleri, sodyum kazeinat ve soya fasulyesi proteinleri gibi proteinler (Agudelo-Chaparro vd., 2022; Jiang vd., 2024); modifiye nişasta, jelatin, jelleştirici gam (Lu vd., 2025) ve kitosan (Zhang vd., 2020) bulunur. Sprey kurutma ile üretilen tozların özellikleri; hava akış hızı, hava bağıl nemi, kurutma sıcaklığı, besleme ve atomizer hızı, taşıyıcı türü ve taşıyıcı maddenin konsantrasyonu gibi çok faktörden etkilenmektedir (Mardani vd., 2024).

Ultrasonik vakumlu sprey kurutma, püskürtme sırasında oluşan termal ve oksidatif stresleri azaltmayı amaçlayan püskürtmeli kurutmaya dayalı bir tekniktir. Hücrelerin canlılığını korumak için, düşük sıcaklık ve vakum koşullarında çalışan ultrasonik nozul sistemlerinde maltodekstrin ve trehaloz gibi kapsülleme ajanlarının kullanılması önerilmektedir (Frakolaki vd., 2021).

Dondurarak kurutma/liyofilizasyon, mikrokapsüllemede kullanılan yaygın olarak kullanılan (gıda ve ilaç endüstrisi) ve etkili bir yöntemdir. Enerji sarfiyatından ötürü pahalı ve zaman alıcı olmasına rağmen, günümüzde mevcut

olan en etkili ve hassas kurutma ve koruma yöntemlerinden biridir. Teknoloji sırasında, kaplamayı ve çekirdek malzemeyi içeren besleme çözeltisi çok düşük bir sıcaklıkta (-40 °C'nin altında) dondurulur ve düşük basınç altında (<300 Pa) süblimasyonla kurutulur. Dondurarak kurutma, kurutma işlemi sırasında düşük sıcaklık ve oksijen miktarının az olmasından dolayı ısıya ve oksijene duyarlı bileşiklerin işlenmesi için uygundur. Fenol içeriği, biyoaktivite, görünüm, renk, doku, aroma ve gıdanın besin değerinin büyük önem taşıdığı hassas bileşikler için önemlidir (Mazâr vd., 2025).

Emülsifikasyon, enkapsüle edilecek materyalin sıvı bir fazda dağıtılması ve daha sonra hücrelerin etrafında koruyucu tabakalar oluşturmak için başka bir karışmayan sıvı içinde emülsifiye edilmesinden oluşmaktadır. Emülsifikasyona dayalı mikrokapsülleme, ölçeklenebilirliği, küçük parçacık boyutu, yüksek üretim hızı ve yüksek hücre canlılığının korunması nedeniyle değerlidir (Udo vd., 2025).

Ekstrüzyon, zararlı çözücüler kullanmayan basit ve düşük maliyetli bir kapsülleme teknolojisidir. Gelişmiş ekipmana ihtiyaç duymadan ılımlı koşullar altında verimli bir şekilde çalışmaktadır. Probiyotikler ve ω -3 (omega-3) yağ asitleri gibi ısıya duyarlı biyoaktiflerin kapsüllemesi için ideal bir tekniktir. Daha spesifik olarak, bu teknik biyoaktiflerin bir hidrokolloid çözeltiye karıştırılmasını ve ardından bir nozul aracılığıyla bir kürleme çözeltisine (örneğin, CaCl_2 , AlCl_3 veya FeCl_2) ekstrüde edilmesini içermektedir. Böylece, ilk karışım bir jel haline gelmekte ve peletler oluşturulmaktadır (Agriopoulou vd., 2023).

Elektrostatik / titreşimli damlatma ekstrüzyonu ise çekirdek ve kaplama malzemelerinin karıştırılması, zıt yüklü çözeltilerde çekirdek kaplama malzemelerinin karışımlarının ekstrüzyonu, mikrokapsüllerin/mikrokürelerin/boncukların dondurularak kurutulması veya etüvde kurutulması aşamalarından oluşmaktadır (Anal ve Singh, 2007).

Koaservasyon, polisakkarit bazlı kapsülleme için en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Polimerler arasındaki elektrostatik etkileşime dayalı koaservat oluşumunu içermekte ve sıcaklık, iyonik güç ve pH gibi çevresel değişikliklere yanıt verebilen dinamik yapılar oluşturmaktadır. Proteinler ve polisakkaritler de dahil olmak üzere birden fazla polimerin kullanımını içeren karmaşık koaservasyon, yüksek kapsülleme verimliliği, mükemmel kontrollü salım özellikleri ve düşük çözünürlük ile probiyotik kapsülleme için yaygın olarak kullanılmaktadır (de Deus vd., 2024).

Akışkan yatak kaplama yöntemi daha çok ilaçların tadını maskelemek ve stabilitesini arttırarak hedef bölgede etki göstermesini sağlamaktır. Kaplanacak materyal hava akımı sayesinde havada asılı kalır ve kaplama materyali bu çekirdek materyal üzerine püskürtülerek katmanlı bir kapsül oluşumu sağlanmaktadır. Havada asılı olan bu materyaller hava akımının artırılmasıyla dışarıya doğru itilerek hava kolonu içerisinde akışkan yatak kurutucuya ulaştırılmaktadır. Son olarak kaplama materyalinin burada kuruyarak sertleşmesi sağlanmaktadır (Tutun ve Yurdakul, 2022).

Elektrospinning, polimer çözeltilerini nano veya mikron boyutunda liflere çekmek için yüksek voltajlı elektrostatik alan kullanılan bir tekniktir. Bu işlemin altında yatan prensip, bir polimer çözeltisi bir elektrik alanına maruz bırakıldığında damlacıkların Taylor konileri şeklinde uzaması ve sonunda lifli bir zara dönüşmesidir (Zhang vd., 2025). Bu yöntem, kapsüllenmiş biyoaktif bileşenlerin üretimi için yenilikçi, uygun maliyetli bir yöntemdir. İşlem ısıya duyarlı bileşenler için uygun koşulların sağlandığı atmosferik basınç ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Teknik yüksek yüzey-hacim oranı, geliştirilmiş biyoaktif moleküllerin özel olarak salınması ve kompozitlerin iyileştirilmiş işlevselliği fırsatlarını sunmaktadır (Mohammadalinejad ve Kurek, 2021).

Günümüzde mikroenkapsülasyon için kullanılan bu yöntemler enkapsülasyon verimliliğini arttırmak için bazı ön işlemlerle birlikte uygulanabilmektedir. Mis-Solval vd., (2019)

püskürtmeli kurutma sırasında kültür canlılığını, iki yaygın protein duvar materyalinin ultra yüksek basınçlı homojenizasyon (UYBH) ile işlenmesi yoluyla artırılıp artırılamayacağını incelemiştir. Probiyotik bir suş olan *Lactobacillus plantarum* NRRL B-1927, 150 Mpa'da UYBH ile işlenmiş soya proteini veya peynir altı suyu proteini içinde süspanse edilmiştir. Süspansiyonlar daha sonra eş zamanlı akışlı püskürtmeli kurutma, karışık akışlı püskürtmeli kurutma veya dondurarak kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulmuş ve hücre canlılığı, parçacık boyutu, nem içeriği ve su aktivitesi açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada UYBH ile modifiye edilmiş duvar materyallerinin daha iyi kaplayabildiği belirlenmiştir. Başka bir çalışmada ise gıdalardaki probiyotik tat bozukluğunu önlemek için mikrokapsülleme ve sonikasyon birlikte kullanılmıştır. *Lactocaseibacillus casei* ATCC 393 suşunun asidifikasyon hızı yavaşlatılmıştır. Çalışmada aljinat konsantrasyonunun ve kitosan kaplamanın asitleşme hızı üzerindeki etkisi test edilmiştir. *L. casei* zayıflatılmak üzere için 6 ve 8 dakikalık iki ultrason uygulamasına maruz bırakılmış ve sonikasyon uygulanan hücreler kapsüllenmiştir. pH değişimi, kitosan-aljinat mikrokapsüllerinin ve 8 dakikalık sonikasyon uygulanan probiyotüğün önemli ölçüde gecikmiş bir asitleşme gösterdiği ortaya konulmuştur. Bu uygulamanın tek başına kullanılan teknolojilerle elde edilen sonuçları önemli ölçüde iyileştirdiği rapor edilmiştir (Giordano vd., 2023).

MİKROENKAPSÜLASYONDA KULLANILAN KAPSÜLLEME MATERYALLERİ

Mikrokapsüllerin kapsülleme materyalleri mikrokapsülleme işleminin verimliliğini, mikrokapsüllerin stabilitesini ve raf ömrünü doğrudan etkileyen çeşitli kimyasal yapılara ve fizikokimyasal özelliklere sahiptir. Kapsülleme materyali, yüksek konsantrasyonlarda uygun reolojik özellikler göstermeli ve aktif maddeyi emülsifiye edebilmelidir. Enkapsülasyon için kullanılan yaygın olarak kullanılan materyaller polisakkaritler (aljinat, kitosan, nişasta, hidrokolloidler), protein kaynaklı içerikler (soya proteini izolatu, jelatin), kompozit malzemeler (kitosan, aljinat, peynir altı suyu proteini) ve nano

materyallerdir (nanofiberler, nanopartiküller, nano kaplamalar) (Zhang vd., 2025). Kapsülleme materyali olarak genellikle tek bir polimer ya da biyopolimer kullanıldığında tek tabaka kaplama; aktif bileşenin ardışık iki farklı kaplama materyali ile kaplandığında ise çift tabaka kaplama ismi verilmektedir. Bazı çalışmalar çift tabaka kaplamanın mikroorganizmalarda stres toleransını artırdığını belirtmiştir (Zhu vd., 2023).

PROBİYOTİKLERİN VE STARTER KÜLTÜRLERİN MİKROENKAPSÜLASYONU

Probiyotikler, 2001 yılında Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), yeterli miktarda uygulandığında konakçı üzerinde yararlı etkilere sahip canlı bir mikroorganizma olarak tanımlanmıştır (FAO/WHO, 2006). Probiyotiklerin bağırsak sağlığını desteklediği, bağırsıklığı güçlendirdiği, alerjik reaksiyonları azalttığı, kolesterol seviyesini düşürebildiği, antikanserojenik etki gösterdiği, obezite ve cilt sağlığı üzerine etkilerinin olduğu bilinmektedir (Kurhan ve Çakır, 2017; Chandrasekaran vd., 2024). *Bifidobacterium* spp., *Lactobacillus* spp., *Lactococcus* spp., *Enterococcus faecalis/faecium*, *Streptococcus thermophilus*, *Pediococcus acidilactici*, *Propionibacterium freudenreichii*, *Bacillus coagulans*, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* Nissle 1917 ve maya türlerinden *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces boulardii* bilinen probiyotikler arasındadır. Bununla birlikte *Akkermansia muciniphila*, *Eubacterium hallii* ve *Faecalibacterium prausnitzii* araştırılan yeni probiyotikler arasındadır (Jan vd., 2024).

Probiyotiklere mikrokapsülleme yapılmasının temel nedeni, canlı mikroorganizmanın etkinliğini, canlılığını ve stabilitesini korumaktır. Enkapsülasyon, probiyotikleri dış çevresel faktörlerden koruyan bir bariyer sağlamaktadır. Böylece probiyotikler mide asitliği ve safra tuzlarına karşı dayanıklılık kazanmaktadır. Gıda veya ilaç formülasyonları sırasında uygulanan ısı, basınç, kurutma gibi işlemler probiyotiklerin canlılıklarına zarar verebilmektedir. Gıda üretimi, depolanması ve taşınması sırasında probiyotik canlılığını etkileyen başlıca çevresel stresler oksijen maruziyeti, bağıl nem, sıcaklık, ozmotik

stres ve pH'taki değişikliklerdir (Yao vd., 2020; Peruzzolo vd., 2025). Mikroenkapsülasyon ile bu zarar en düşük seviyeye indirgenebilmekte ve kontrollü salınım sağlanabilmektedir. Ayrıca gıda ortamında bulunan kimyasal ve doğal antimikrobiyalere karşı koruma sağlanmaktadır (Jayalalitha vd., 2025). Enkapsülasyon materyallerin aromasını, rengini ve istenmeyen tadını maskelemek için de kullanılabilir. Ayrıca, kapsüllenmiş probiyotikler yoğurt, içecek, bar gibi çeşitli gıdalara daha kolay entegre edilebilirler (Yang vd., 2024). Mikroenkapsülasyonun bu olumlu etkileri sayesinde birçok ticari probiyotik ürünün enkapsüle edilerek satışa sunulduğu bilinmektedir. Örneğin; Probiotic Pearls™ *Acidophilus*, jelatin ve pektin ile enkapsüle edilmiş *Lactobacillus acidophilus* NCFM ve *Bifidobacterium longum* BB536 suşlarını içermektedir. Benzer olarak Probiocap™ Technology, dondurularak kurutulmuş toz granül, akışkan yataklı püskürtme ile lipitlerle kaplanmış probiyotiklerdir (Yoha vd., 2022).

Kapsüllenmiş probiyotik hücrelerin hayatta kalması, bakteri suşu, mikrokapsül boyutu, kapsül malzemesinin konsantrasyonu, ilk hücre sayısı dahil olmak üzere mikrokapsüllerin fizikokimyasal özelliklerine bağlıdır. Probiyotiklerin mikrokapsüllemesi için kapsülleme malzemesinin seçimi çok önemlidir çünkü probiyotikleri kapsüllemek için kullanılan maddeler gıda sınıfı "genel olarak güvenli kabul edilen" (GRAS), biyolojik olarak parçalanabilir ve çekirdek ile çevresi arasında fiziksel bir bariyer oluşturabilmelidir. Kaplama malzemesi seçimi için temel kriterler esas olarak işleme ve uzun süreli depolama sırasında bakteri hücrelerinin canlılığını iyileştirme yeteneğine ve ayrıca çözünürlük, moleküler ağırlık, film oluşturma ve emülsifiye edici özelliklere dayanmaktadır (Shishir vd., 2018; Rajam ve Subramanian, 2022).

Probiyotikleri kapsüllemek için ekstrüzyon (Peker vd., 2024), emülsifikasyon (Udo vd., 2025), püskürtmeli kurutma (Gullifa vd., 2023), ve dondurarak kurutma (Rengadu vd., 2021) dahil olmak üzere çeşitli teknik araştırılmıştır. Teknikler kapsülleme verimliliği, raf ömrü ve kontrollü salınım özellikleri açısından farklı avantajlar

sunmaktadır. Probiyotik bakterilerin püskürterek kurutma işleminde, sıcaklık ve ozmotik basıncın etkisiyle hücre membranında ve proteinlerinde meydana gelen hasarlardan dolayı canlılık önemli ölçüde azalabilmektedir. Bu nedenle kaplama materyali ve kullanılacak enkapsülasyon yönteminin optimizasyonu önem arz etmektedir (Çakır, 2006).

Kaplama materyali olarak aljinat, jelatin, peynir altı suyu (Rojas-Muñoz vd., 2023), sodyum aljinat (Peker vd., 2024), kitosan (Călinoiu vd., 2019), Arap gamı ve yağsız süt (Kamwa vd., 2024), dirençli nişasta (Rengadu vd., 2021) gibi çeşitli bitki ekstraktları, proteinler, diyet lifleri ve biyopolimerler kullanılmaktadır. Pupa vd., (2021) *Lactobacillus plantarum* 31F, 25F, 22F, *Pediococcus pentosaceus* 77F, *P. acidilactici* 72N suşlarını ekstrüzyon, emülsiyon ve püskürtmeli kurutma tekniklerini kullanarak aljinat (%1.5) ve kitosan (%0.5) ile kapsüllenmiştir. Bu çalışmada olduğu gibi birden fazla suşun kullanılmasında dikkat edilecek bazı hususlar vardır. Suşların çevresel koşullara ve işleme koşullarına gösterdikleri hassasiyet farklı olabilir. Yine çoklu suş kullanımında probiyotiklerin suşa özgü antagonizm göstermeleri söz konusudur. Bu antagonizm, suşa özgü besin rekabetine ve bakteriyosin üretimine bağlı olarak bireysel suşların büyümesini baskılayabilmektedir (Fijan vd., 2022).

Probiyotiklerin antioksidanlar ve probiyotikler gibi aktif bileşiklerle kombinasyonu, yeni fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesi için güncel uygulamalar sunmaktadır. Probiyotiklerin probiyotiklerle birlikte kapsüllenmesi, stabiliteelerini ve biyoyararlanımlarını artırarak sağlık yararlarını en üst düzeye çıkarmaktadır (Bhutto vd., 2025). Bir çalışmada püskürtmeli kurutma kullanarak *Lactobacillus helveticus* polimerik bir matriste (süt tozu/maltodekstrin/trehaloz/fruktooligosakkarit /nişasta) kapsüllenmiş ve beyaz çikolataya dahil edilmiştir. Kapsüllenmiş probiyotiklerin beyaz çikolata içinde 22 °C'de 130 güne kadar hayatta kalabilmişlerdir. Bu sonuç, polimerik matriste kapsülleme yönteminin çikolata gibi ürünlerde probiyotik stabilitesini artırarak endüstriyel üretim ve tüketici sağlığı açısından etkili bir çözüm

sunduğunu ortaya koymaktadır (Barro vd., 2024). Martellet vd. (2023) *Kluyveromyces marxianus*'u aljinat ve peynir altı suyu ve karnıyarık otundan elde edilen bir prebiyotik ile kapsüllenmiştir. Titreşimli ekstrüzyon işlemi ile kapsüllenmiş maya, canlılığını korumuştur. Kapsüllenmiş mayalar, gastrointestinal sistemin simülasyonlarına maruz bırakıldıklarında asidik koşullara karşı daha fazla direnç göstermiştir.

Geleneksel olarak, süt ürünleri probiyotiklerin en iyi taşıyıcıları olarak kabul edilmektedir. Günümüzde probiyotikler, fermente süt, yoğurt, peynir ve dondurma gibi çok sayıda süt ürününe entegre edilmiştir. Ancak, veganlığın yaygınlaşması, laktoz intoleransı, yüksek kolesterol içeriği ve süt proteini alerjisi gibi süt ürünlerinin tüketimiyle ilişkili dezavantajların farkındalığı nedeniyle, tüketicilerin tercihleri günümüzde daha çok süt ürünü içermeyen probiyotik ürünlerden yana olabilmektedir. Son yıllarda meyveler (Santos Monteiro vd., 2020), meyve ve sebze suları (Paim vd., 2016; Maia vd., 2023), fermente tahıl içecekleri (Laurujisawat vd., 2025) ve çay (Yee vd., 2019) gibi süt ürünü olmayan gıda matrisleri probiyotikleri içeren ürünler arasında yer almakta ve araştırılmaktadır. Süt ürünü olmayan gıda matrisleri probiyotiklerin canlılığını olumsuz etkileyebilecek önemli miktarda organik asit, çözünmüş oksijen ve doğası gereği düşük pH değerleri içerebilmekte veya gıdanın saklama koşulları ortam sıcaklığı olabilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, probiyotiklerin canlılığını korumak amacıyla kapsülleme teknikleri uygulanmaktadır (Koh vd., 2022). Da Silva Gomez vd. (2024) fermente sebze içeceğine *Bifidobacterium animalis* ssp. *lactis* ve *L. acidophilus* suşlarının, serbest ve kapsüllenmiş formlarını eklemiştir. Kapsülleme, %2'lik aljinat çözeltisi ve iyonik jelleşme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda 40 günlük depolamada serbest hücreler canlılığını yitirirken, kapsüllenmiş hücreler canlılığını sürdürmüştür. Probiyotik mikroorganizmaların mikroenkapsülasyonu ve gıdalarda kullanımı ile ilgili yapılan bazı çalışmalar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Probiyotiklerin mikroenkapsülasyonu ve gıda uygulamaları

Gıda Matrisi	Mikroorganizma	Mikroenkapsülasyon Tekniği	Kapsülasyon Materyali	Referans
Yoğurt	<i>L. plantarum</i> PRK7	Ekstrüzyon	Sodyum aljinat İnülin Yağsız süt	Kowsalya vd., (2023)
Beyaz peynir	<i>L. plantarum</i>	Koaservasyon	Peynir altı suyu proteini Arap gamı	Sharifi vd., (2021)
Çedar peyniri	<i>L. acidophilus</i> , <i>B. infantis</i>	Emülsifikasyon	Sodyum aljinat Nişasta	Hassan vd., (2020)
Kuru fermente sosis	<i>L. reuteri</i>	Ekstrüzyon/ emülsiyon	Aljinat	Muthukumarasamy ve Holley, (2006)
Acerola ve ciriguella suyu (Barbados kirazı ve İspanyol eriği)	<i>L. rhamnosus</i> , <i>L. casei</i> <i>L. plantarum</i>	Sprey kurutma	Maltodekstrin	Souza vd., (2020)
Mango suyu	<i>L. plantarum</i>	Jelleştirme	Kalsiyum-Aljinat-Soya Proteini	Praepanitchai vd., (2019)
Elma suyu	<i>L. plantarum</i> 299v	Dondurarak kurutma	Maltodekstrin Direnci nişasta	Sun vd., (2023)
Jöle	<i>L. acidophilus</i>	Emülsifikasyon	Aljinat Kitosan	Talebzadeh ve Sharifan, (2017)
Bitter çikolata	<i>A. muciniphila</i> <i>L. casei</i>	Dondurarak kurutma	Ksantan Jellan gamı	Marcial-Coba vd., (2019)
Kek	<i>S. boulardii</i> <i>L. acidophilus</i> <i>Bifidobacterium bifidum</i>	Sprey kurutma ve soğutma	Arap gamı β-siklodekstrin	Arslan-Tontul vd., (2019)

Starter kültür; tek tip, iki ya da daha fazla mikroorganizmanın karışımını içeren ve metabolizmaları veya enzimatik aktiviteleri sonucu ortaya çıkan bileşik ve ürünlerin gıdalara istenen özellikleri kazandırdığı mikroorganizma preparatları olarak tanımlanabilir. Starter kültürler, peynir, yoğurt ve diğer fermente süt ürünlerinin, fırıncılık ürünlerinin, fermente tahıllar ve fermente meyve ve sebze ürünlerinin, bira ve şarap gibi alkollü içeceklerin, sirke, sosis ve sucuk gibi çeşitli gıdaların üretiminde kullanılmaktadır (García-Díez ve Saraiva, 2021). Laktik asit bakterileri (*Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*); maya (*S. cerevisiae*, *Kluyveromyces* spp.) ve küf türleri (*Penicillium camemberti*, *Penicillium roqueforti* vb.) çeşitli gıdalarda starter kültür olarak kullanılmaktadır (Leroy ve Vuyst, 2004; Chávez vd., 2012). Starter kültürler, mikrobiyal güvenliğe katkı sağlamak ve organoleptik, teknolojik, beslenme veya sağlık avantajı sunabilmektedirler.

Antimikrobiyal madde, tatlandırıcı, aromatik bileşik, vitamin, enzim üretimi veya probiyotik özelliklere sahip laktik asit bakterileri bunlara örnek verilebilir (Leroy ve Vuyst, 2004).

Bu kültürlerin enkapsülasyonu, kapsüllenmiş mikroorganizmaların gıda fermentasyonunda kullanımı, geçmişte yaygın olarak bildirilen immobilizasyon prosedürünün koruyucu etkisine dair kanıtların ve bazı suşların kapsüllenmiş formların daha iyi fermentasyon özelliğine sahip olmasının ardından tekrar ilgi görmeye başlamıştır (De Prisco vd., 2017).

Bir çalışmada püskürtmeli kurutucu kullanarak starter kültürün mikrokapsülleri üretilmiş ve iki farklı salam formülasyonuna dahil edilmiştir. Depolama sırasında su aktivitesinin azaldığı ve mikrobiyolojik güvenliğin ve ürün stabilitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada,

mikroenkapsüllenmiş starter kültürlerin sodyum nitritin işlevsel stabilitesini uzatmada ve tüketici kabulünden ödün vermeden salamın mikrobiyolojik güvenliğini ve kalitesini iyileştirmede önemli etkilerinin olduğu ve endüstriyel uygulama potansiyeli vurgulanmaktadır (Cence vd., 2025). Başka bir çalışmada ise serbest ve mikrokapsüllenmiş *Lactiplantibacillus plantarum* HL4 ve *Pediococcus parvulus* HL14 kullanılarak salatalık turşusu üretimi yapılmıştır. Kültürler ekstrüzyon yöntemi kullanılarak sodyum aljinat (kaplama maddesi olarak) ve inülin (prebiyotik kaynak olarak) ile kapsüllenmiştir. Depolamanın 4. haftasına kadar mikrokapsüllü hücre sayısı ($> 6 \log$ KOB/g) korunmuştur (Peker vd., 2024). Martins vd. (2023), kendiliğinden indüklenen anaerobik fermentasyon altında kahvedeki taze ve mikrokapsüllenmiş *Torulaspora delbrueckii* ve *S. cerevisiae*'nın fermentasyon performanslarını karşılaştırmayı amaçlamıştır. Doğal süreçte 180 saatlik fermentasyondan sonra, mikrokapsüllenmiş *T. delbrueckii* sayısı kapsüllenmemiş *T. delbrueckii*'den fazla bulunmuştur. Uçucu bileşikler her iki mayada türünde de tespit edilmiştir, ancak mikrokapsülleme bu bileşiklerin konsantrasyonunu önemli ölçüde artırmıştır. Duyusal analiz açısından, mikrokapsüllenmiş kültür inoküle edilen kahveler doğal işlemde baskın meyvemsi, karamel ve fındık notaları göstermiştir.

BAKTERİYOFAJLARIN MİKROENKAPSÜLASYONU

Bakteriyofajlar/fajlar, bakteri hücrelerini enfekte ederek bakterilerin parçalanmasını sağlayan virüslerdir (Anany vd., 2017). Fajların bakteriyel enfeksiyonları tedavi etmek için terapötik ajanlar olarak kullanımı, fajların 1917'deki keşfinden hemen sonra başlamıştır (d'Herelle 1917). Antibakteriyel ajanlar olarak fajlara olan ilgi, yirmi yıl sonra penisilin keşfini takiben hızla azalmış ancak günümüzde çoklu ilaca dirençli (MDR) bakterilerin neden olduğu enfeksiyonlardaki artış nedeniyle fajların terapötik kullanımını yeniden gözden geçirilmeye başlanmıştır (Egido vd., 2022). Hedef konakçıları prokaryot hücreler olan fajlar insanlara karşı zararlı bir etki

oluşturmamaktadır. Bununla birlikte gıdalarda kullanımı gıdanın organoleptik özelliklerine zarar vermemektedir. Biyolojik materyaller olmaları ve kalıntı bırakmamaları gıdalarda kullanımını cazip hale getirmektedir (Melo vd., 2020; Kawacka vd., 2020). Günümüzde fajların gıdalarda kullanımına dair pek çok çalışma yapılmaktadır (Duc vd., 2020; Tayyarcan vd., 2022; Encu vd., 2024; Chahar vd., 2025; Khan vd., 2025; Xiao vd., 2025; Zhong vd., 2025).

Biyolojik ajanlar olarak fajlar bir dereceye kadar zorlu ortam koşullarına duyarlıdır. Olumsuz çevre koşullarına dayanma konusunda önemli ölçüde farklılık göstermektedirler. Zorlu koşullarda kolayca inaktive edilebilir ve uzun süre saklanmaları zorlaşabilir. Bu sorunları çözenin olası bir yolu, fajı organik polimer malzemelerden oluşan mikrokürelelere veya parçacıklara yerleştirmek için mikrokapsülleme teknolojisini kullanmaktır. Bakteriyofaj kapsülleme yöntemlerinin başında emülsifikasyon ve ekstrüzyon yöntemleri gelmektedir (Choińska-Pulit vd., 2015; Li vd., 2021). Liyofilizasyon, damla ekstrüzyon, sprey kurutma, sprey liyofilizasyon, emülsiyon, lipozom hapsedme, elektrospinning, elektrosprey, hidrojel ve biyofilmler gibi çeşitli tekniklerde günümüzde fajların mikroenkapsülasyonunda kullanılan yöntemler arasındadır. En çok kullanılan kapsülleme materyalleri arasında basit şekerler (glikoz) veya disakkaritler (sükroz, trehaloz, laktoz, maltoz), polioller (mannitol, sorbitol, gliserol), proteinler (peynir altı suyu proteini, jelatin, sodyum kazeinat), doğal polimerler (sodyum aljinat, maltodekstrin, kitosan, karragenan, polietilen glikol, nişastalar), yapay polimerler (polietilen, politetrafloroetilen ve polipropilen), yağsız süt, amino asitler bulunmaktadır (Hernández-Arteaga vd., 2025).

Tang vd. (2013), Felix O1 fajının aljinat-peynir altı suyu proteini mikrokürelelerinde mikrokapsüllenmesini sağlamış ve fajın simüle edilmiş mide sıvısında hayatta kalma oranını, sadece aljinat içeren mikrokürelelere kıyasla önemli ölçüde artırmıştır. Aljinat matrisine peynir altı suyu proteini eklenmesi, kapsüllenmiş fajın simüle edilmiş bağırsak sıvısına salınımını önemli ölçüde

hızlandırmıştır. Araştırmacılar sonuç olarak bu özelliklerle fajların tavuklar gibi çiftlik hayvanlarına oral yoldan uygulanmasında başarı olasılığını artırabileceğini belirtmişlerdir. Cui vd., (2017) sığır etinde *Escherichia coli* O157:H7'nin biyolojik kontrolü için lipozom kapsüllü fajla gömülü yeni kitosan filmi üretmişlerdir. Böylece asidik bileşiklerin, enzimlerin varlığında fajların gıdalardaki biyoaktivite kaybını etkili bir şekilde önlemeyi hedeflemişlerdir. Lipozom kapsüllenmiş fajla gömülmüş kitosan film, sığır etinin duysal özelliklerini etkilemeden *E. coli* O157:H7'ye karşı yüksek antibakteriyel aktivite göstermiştir. Acar Soykut vd. (2019) fajların fizyolojik koşullara direncini artırmak için mikrokapsülleme teknolojisi kullanılmış ve elde edilen mikrokapsüller vücut koşullarını simüle eden ortamlarda test edilmiştir. Bu amaçla, farklı kaynaklardan *Bacillus subtilis*, *Salmonella* Enteritidis, *Salmonella* Typhimurium fajları izole edilmiş ve daha sonra sprey kurutucu kullanılarak %1.33 sodyum aljinat ile mikrokapsüllenmiştir. Sonuç olarak, 2 saatlik inkübasyondan sonra mikrokapsüllenmiş fajların maksimum titre azalmasının 2.29 log birim olduğu, serbest fajların ise 15 dakikalık inkübasyondan sonra canlılıklarını kaybettiği bulunmuştur. Benzer şekilde, mikrokapsüllemenin safra tuzu ortamında fajların stabilitesini artırdığı tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada *Salmonella* fajı T156 mikrokapsüllenmiş ve yapay olarak kontamine edilmiş süt ve marulda 4 ve 25 °C'de *Salmonella*'nın gelişimini etkili bir şekilde inhibe etmiştir. Fajın süt ve marulda 25 °C'de maksimum antibakteriyel etkinliği sırasıyla %57.93 ve %55.47 olarak tespit edilmiştir (Li vd., 2021). Choi vd., (2023) T4 fajının antimikrobiyal ajan olarak kullanılabilirliğini artırmak için ince kuru toz haline püskürtürerek kurutmuşlardır. Maltodekstrin ve trehaloz ile birlikte kapsüllenmiş ve iki karışılabilir sistemin faj litik aktivitesi üzerindeki etkileri ve optimum formülasyonun belirlenmesi araştırılmıştır. Maltodekstrin %11 ve trehaloz %4 oranında kullanıldığında en yüksek faj litik aktivitesi tespit edilmiştir. Bu formülasyon, 25°C'de dahi %22.6 bağıl nemde faj litik aktivitesini etkili bir şekilde korumuştur. Bir çalışmada, kitosan ve aljinattan oluşan ultra ince çok katmanlı bir film içeren bir *Salmonella enterica* bakteriyofajının üretimi ve gıda ambalaj

uygulamaları için antibakteriyel bir kaplama olarak potansiyeli çalışılmıştır. Çalışmada kitosan/aljinat filmi, katman-katman (LbL) kendiliğinden birleşme tekniği ile hazırlanmıştır. *Siphoviridae* morfotipine (MET P1-001_43) ait olan ve *S. Enteritidis*'i enfekte eden bir bakteriyofaj kitosan/aljinat filme yüklenmiştir. Bakteriyofaj içeren çok katmanlı yapılar pH 7.0'da antibakteriyel aktivite gösterirken; asidik koşullarda antibakteriyel aktivite göstermemiştir. *S. Enteritidis* ile kontamine edilmiş tavuk parçasını, yüzeyi faj yüklü kitosan/aljinat çok katmanlı yapılarıyla modifiye edilmiş alüminyum folyo ile sarmanın tavuk etindeki koloni sayısını azalttığını ve etin doğrudan faj solüsyonuyla muamele edilmesi kadar etkili olduğunu tespit etmişlerdir (Tidim vd., 2024).

MİKROENKAPSÜLASYONUN AVANTAJLARI VE SINIRLAMALARI

Mikroenkapsülasyonun pek çok avantajı bulunmakta ve yapılan çalışmalar ile ortaya konulmaktadır. Bu avantajları belirtmek gerekirse mikroorganizma veya hassas bileşiklerin korunması; fiziksel ve teknik özelliklerin (çözünürlük, dağılılabilirlik, akışkanlık) iyileştirilmesi; kapsüllerin küçük çaplı olması kütle transfer sınırlamalarını azaltmaya yardımcı olması; oksidasyona karşı koruma; aktif bileşenlerin korunması ve kontrollü salınımı; toksik maddelerin güvenli ve rahat bir şekilde taşınması; gıdalarda renk, tat ve koku gibi organoleptik özelliklerinin maskelenmesi, yarı geçirgen zardan besin ve metabolitlerin difüzyonunu kolaylaştırmak şeklinde sıralanabilir (Choińska-Pulit vd., 2015). Mikroenkapsülasyon teknolojisinin sağlanmış olduğu yararların yanında bazı dezavantajları bulunabilmektedir. Mikroenkapsülasyon için kullanılan yöntemlere göre değişen olumsuzluklar homojen olmayan kapsüllerin üretimi, pahalı yatırım gereksinimi, ürün maliyeti, ölçüm parametrelerinin optimizasyonu (erime, atomizer hava sıcaklığı ve basıncı, soğutma sıcaklığı, besleme akışı), işlem hızı, viskoz çözeltilerle ilgili zorluklar şeklinde belirtilebilir (Oliver ve Ponce-Alquicira, 2022).

SONUÇ

Bu derlemede sunulan çalışmalar, mikroenkapsülasyon teknolojisinin gıda endüstrisinde probiyotikler, starter kültürler ve bakteriyofajlar gibi mikroorganizmaların etkinliğini artırmada önemli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Mikroenkapsülasyon fonksiyonel gıdaların geliştirilmesi, ürün kalitesinin artırılması ve gıda güvenliğinin sağlanması alanlarında büyük bir öneme sahiptir. Mikroenkapsülasyon mikroorganizmaların stabilitesinin ve canlılığının artırılması, raf ömrü boyunca canlılıklarını sürdürmesi, gıdalarda farklı materyaller ile kullanılarak fonksiyonel özelliklerin kazandırılması gibi işlevlere sahiptir. Çalışmalar özellikle probiyotik mikroorganizmaların mikroenkapsülasyonu üzerine yoğunlaşmış ve başarılı birçok çalışma ve sonuç elde edilmiştir. Bakteriyofajların serbest halde gıdalarda kullanımı gıda mikrobiyolojisi açısından hala popüler çalışma konuları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte mikrokapsüllenmiş fajların gıda ortamında değerlendirilmesine yönelik daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, patojenik ve bozulma etmeni mikroorganizmaların biyokontrolü amacıyla fajların gıda ambalajlarına entegre edilmesine odaklanmalıdır. Bu alanda daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarların, başka kişiler ve/veya kurumlar ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZAR KATKILARI

Şeyma Betül ENCU, Esra ACAR SOYKUT ve İbrahim ÇAKIR makalenin yazımı ve kontrolü aşamalarına katkı sağlamışlardır. Yazarlar makalenin son halini okuyarak onaylamışlardır.

KAYNAKLAR

Acar Soykut, E., Tayyarcı, E. K., Evran, Ş., Boyacı, İ. H., Çakır, İ., Khaaladi, M., Fattouch, S. (2019). Microencapsulation of phages to analyze their demeanor in physiological conditions. *Folia microbiologica*, 64(6), 751-763. <https://doi.org/10.1007/s12223-019-00688-1>

Agriopoulou, S., Tarapoulouzi, M., Varzakas, T., Jafari, S. M. (2023). Application of encapsulation

strategies for probiotics: from individual loading to co-encapsulation. *Microorganisms*, 11(12), 2896. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122896>

Agudelo-Chaparro, J., Ciro-Velásquez, H. J., Sepúlveda-Valencia, J. U., Pérez-Monterroza, E. J. (2022). Microencapsulation of *Lactobacillus rhamnosus* ATCC 7469 by spray drying using maltodextrin, whey protein concentrate and trehalose. *Food Science and Technology International*, 28(6), 476-488. <https://doi.org/10.1177/10820132211020621>

Anal, A. K., Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Trends in food Science and Technology*, 18(5), 240-251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.01.004>

Anany, H., Chou, Y., Cucic, S., Derda, R., Evoy, S., Griffiths, M. W. (2017). From bits and pieces to whole phage to nanomachines: pathogen detection using bacteriophages. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8(1), 305-329. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-041715-033235>

Arslan-Tontul, S., Erbas, M., Gorgulu, A. (2019). The use of probiotic-loaded single-and double-layered microcapsules in cake production. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 11(3), 840-849. <https://doi.org/10.1007/s12602-018-9467-y>

Barro, N. P. R., da Silva, L. M., Fischer, B., Cansian, R. L., Junges, A., Mignoni, M., Valduga, E. (2024). Survival of encapsulated and free probiotic cells *Lactobacillus helveticus* under different simulated conditions and in white chocolate. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(6), 4807-4819. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02535-5>

Bhutto, R. A., Mahar, H., Khanal, S., Wang, M., Iqbal, S., Fan, Y., Yi, J. (2025). Recent trends in co-encapsulation of probiotics with prebiotics and their applications in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 156, 104829. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104829>

Browning, L. W., Wang, H., Taylor, J. W., Wilde, P., Rodriguez-Garcia, M., Holland, L. A. M.,

- Knowles, T. P. (2025). Digestibility and enteric release achieved with microencapsulates made from emulsion-templated plant proteins. *Sustainable Food Technology*, 3(3), 689-699. [10.1039/D4FB00375F](https://doi.org/10.1039/D4FB00375F)
- Calderón-Oliver, M., Ponce-Alquicira, E. (2022). The role of microencapsulation in food application. *Molecules*, 27(5), 1499. <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
- Calderón-Oliver, M., Ponce-Alquicira, E. (2022). The role of microencapsulation in food application. *Molecules*, 27(5), 1499. <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
- Călinoiu, L. F., Ștefănescu, B. E., Pop, I. D., Muntean, L., Vodnar, D. C. (2019). Chitosan coating applications in probiotic microencapsulation. *Coatings*, 9(3), 194. <https://doi.org/10.3390/coatings9030194>
- Cence, K., Vendruscolo, M. J. D., da Silva, L. M., Colet, R., Junges, A., Steffens, C., Zemi, J., Valduga, E. (2025). Impact of microencapsulated starter culture on the quality characteristics of Italian-type salami during storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19(3), 1913-1928. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-03083-8>
- Chahar, M., Rana, A., Gupta, V. K., Singh, A., Singh, N. (2025). Application of a novel lytic phage to control enterotoxigenic *Escherichia coli* in dairy food matrices. *International Journal of Food Microbiology*, 426, 110924. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110924>
- Chandrasekaran, P., Weiskirchen, S., Weiskirchen, R. (2024). Effects of probiotics on gut microbiota: an overview. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11), 6022. <https://doi.org/10.3390/ijms25116022>
- Chávez, R., Fierro, F., Rico, R. O. G., Laich, F. (2012). Mold-fermented foods: *Penicillium* spp. as ripening agents in the elaboration of cheese and meat products. In *Mycofactories* (pp. 73-98). Bentham Science Publishers. <https://doi.org/10.2174/97816080522331110101>
- Choi, I., Lee, J. S., Han, J. (2023). Maltodextrin-trehalose miscible system-based bacteriophage encapsulation: Studies of plasticizing effect on encapsulated phage activity and food application as an antimicrobial agent. *Food Control*, 146, 109550. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109550>
- Choińska-Pulit, A., Mituła, P., Śliwka, P., Łaba, W., Skaradzińska, A. (2015). Bacteriophage encapsulation: Trends and potential applications. *Trends in Food Science and Technology*, 45(2), 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.001>
- Cui, H., Yuan, L., Lin, L. (2017). Novel chitosan film embedded with liposome-encapsulated phage for biocontrol of *Escherichia coli* O157: H7 in beef. *Carbohydrate Polymers*, 177, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.137>
- Çakır, İ. (2006). Mikroenkapsülasyon tekniğinin probiyotik gıda üretiminde kullanımı. Türkiye 9. Gıda Kongresi; 24-26 Mayıs 2006, Bolu, Türkiye.
- D'Herelle, F. (1917). An invisible microbe that is antagonistic to the dysentery bacillus. *CR Acad Sci*, 165, 373-375.
- da Silva Gomes, A., Costa, K. S., Salomao, B. D. C. M. (2024). Antagonism and survival of probiotics encapsulated in functional yogurt-like fermented vegetable beverage. *Food Bioscience*, 61, 104728. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104728>
- de Deus, C., Duque-Soto, C., Rueda-Robles, A., Martinez-Baena, D., Borrás-Linares, I., Quirantes-Piné, R., ..., Lozano-Sánchez, J. (2024). Stability of probiotics through encapsulation: Comparative analysis of current methods and solutions. *Food Research International*, 197, 115183. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115183>
- de Melo, A. M., Barbi, R. C. T., Chaves Almeida, F. L., de Souza, W. F. C., de Melo Cavalcante, A. M., de Souza, H. J. B., Botrel, D. A., Borges, S. V., Costa, R. G., Quirino, M. R., de Sousa, S. (2022). Effect of microencapsulation on chemical composition and antimicrobial, antioxidant and cytotoxic properties of lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) essential oil. *Food Technology and Biotechnology*, 60(3), 386-395. <https://doi.org/10.17113/ftb.60.03.22.7470>

- De Prisco, A., van Valenberg, H. J., Fogliano, V., Mauriello, G. (2017). Microencapsulated starter culture during yoghurt manufacturing, effect on technological features. *Food and Bioprocess Technology*, 10(10), 1767-1777. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1946-8>
- Duc, H. M., Son, H. M., Yi, H. P. S., Sato, J., Ngan, P. H., Masuda, Y., Honjoh, K., Miyamoto, T. (2020). Isolation, characterization and application of a polyvalent phage capable of controlling *Salmonella* and *Escherichia coli* O157: H7 in different food matrices. *Food Research International*, 131, 108977. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.108977>
- Egido, J. E., Costa, A. R., Aparicio-Maldonado, C., Haas, P. J., Brouns, S. J. (2022). Mechanisms and clinical importance of bacteriophage resistance. *FEMS Microbiology Reviews*, 46(1), fuab048. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuab048>
- Emon, D. D., Islam, M. S., Mazumder, M. A. R., Aziz, M. G., Rahman, M. S. (2025). Recent applications of microencapsulation techniques for delivery of functional ingredient in food products: a comprehensive review. *Food Chemistry Advances*, 6, 100923. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100923>
- Encu, Ş. B., Yıldırım, A., Akbaş, S., Çakır, İ., Soykut, E. A. (2024). Taze dilimlenmiş meyvelerde *Salmonella* Typhimurium'un fajlarla biyokontrolü. *Gıda*, 49(2), 370-384. <https://doi.org/10.15237/gida.GD24010>
- Fanger, G. O. (1974). Microencapsulation: a brief history and introduction. *Microencapsulation: Processes and Applications*, 1-20.
- FAO/WHO (2006) Probiotics in Food: Health and Nutritional Properties and Guidelines for Evaluation. Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation on Evaluation of Health and Nutritional Properties of Probiotics in Food Including Powder Milk with Live Lactic Acid Bacteria, Cordoba, Argentina, 1-4 October 2001 [and] Report of a Joint FAO/WHO Working Group on Drafting Guidelines for the Evaluation of Probiotics in Food, London, Ontario, Canada, 30 April-1 May 2002. FAO Food and Nutrition Paper 85, Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization, Rome.
- Fijan, S., Kocbek, P., Steyer, A., Vodičar, P. M., Strauss, M. (2022). The antimicrobial effect of various single-strain and multi-strain probiotics, dietary supplements or other beneficial microbes against common clinical wound pathogens. *Microorganisms*, 10(12), 2518. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122518>
- Frakolaki, G., Giannou, V., Kekos, D., Tzia, C. (2021). A review of the microencapsulation techniques for the incorporation of probiotic bacteria in functional foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(9), 1515-1536. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1761773>
- García-Díez, J., Saraiva, C. (2021). Use of starter cultures in foods from animal origin to improve their safety. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2544. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052544>
- Giordano, I., Maresca, D., Mauriello, G. (2023). Microencapsulation and sonication: A multiple physical approach to attenuate the probiotic *Lactocaseibacillus casei* ATCC 393. *Heliyon*, 9(12).10.1016/j.heliyon.2023.e23144
- Gullifa, G., Risoluti, R., Mazzoni, C., Barone, L., Papa, E., Battistini, A., Fraguas, R. M., Materazzi, S. (2023). Microencapsulation by a spray drying approach to produce innovative probiotics-based products extending the shelf-life in non-refrigerated conditions. *Molecules*, 28(2), 860. <https://doi.org/10.3390/molecules28020860>
- Hassan, H., Gomaa, A., Subirade, M., Kheadr, E., St-Gelais, D., Fliss, I. (2020). Novel design for alginate/resistant starch microcapsules controlling nisin release. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 1186-1192. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.248>
- Hernández-Arteaga, A. M., Mendoza-Corvis, F., Salgado-Behaine, J., Gontijo, M., Batalha, L. S., Perez, G., Sierra, O. P., Soto Lopez, M. E. (2025). Application of conservation strategies for bacteriophages used in the biocontrol of

- pathogenic microorganisms in food. *Journal of Food Safety*, 45(1), e70014. <https://doi.org/10.1111/jfs.70014>
- Jan, T., Negi, R., Sharma, B., Kumar, S., Singh, S., Rai, A. K., Shreaz, S., Rustagi, S., Chaudhary, N., Kaur, T., Kour, D., Sheikh, M. A., Kumar, K., Yadav, A. N., Ahmed, N. (2024). Next generation probiotics for human health: An emerging perspective. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35980>
- Jayalalitha, V., Elango, A., Pugazhenth, T. R., Balasundaram, B., Priyadharsini, R. (2025). Exploring the Biopreservation Strategies in Dairy. *Journal of Biology and Nature*, 17(2), 35-46. <https://doi.org/10.56557/joban/2025/v17i29439>
- Jiang, Y., Luo, Z., Xiang, F., Liu, Y., Yan, J., Wang, J. (2024). Fabrication and Encapsulation of Soy Peptide Nanoparticles Using Ultrasound Followed by Spray Drying. *Foods*, 13(23), 3967. <https://doi.org/10.3390/foods13233967>
- Jyothi, N. V. N., Prasanna, P. M., Sakarkar, S. N., Prabha, K. S., Ramaiah, P. S., Srawan, G. Y. (2010). Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. *Journal of Microencapsulation*, 27(3), 187-197. <https://doi.org/10.3109/02652040903131301>
- Kamwa, R., Khurajog, B., Muangsin, N., Pupa, P., Hampson, D. J., Prapasarakul, N. (2024). Water-soluble microencapsulation using gum Arabic and skim milk enhances viability and efficacy of *Pediococcus acidilactici* probiotic strains for application in broiler chickens. *Animal Bioscience*, 37(8), 1440. [10.5713/ab.23.0446](https://doi.org/10.5713/ab.23.0446)
- Kawacka, I., Olejnik-Schmidt, A., Schmidt, M., Sip, A. (2020). Effectiveness of phage-based inhibition of *Listeria monocytogenes* in food products and food processing environments. *Microorganisms*, 8(11), 1764.
- Khan, A., Joshi, H. (2025). Isolation and Characterization of Stress-Tolerant Bacteriophages for Effective Biocontrol of Foodborne Pathogen. *Food and Bioprocess Technology*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03885-8>
- Koh, W. Y., Lim, X. X., Tan, T. C., Kobun, R., Rasti, B. (2022). Encapsulated probiotics: Potential techniques and coating materials for non-dairy food applications. *Applied Sciences*, 12(19), 10005. <https://doi.org/10.3390/app121910005>
- Kowsalya, M., Sudha, K. G., Ali, S., Velmurugan, T., Rajeshkumar, M. P. (2023). Sustainability and controlled release behavior of microencapsulated *Lactobacillus plantarum* PRK7 and its application in probiotic yogurt production. *Food Bioscience*, 52, 102430. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102430>
- Kurhan, Ş., Çakir, İ. (2017, November). Lactic acid bacteria mediated apoptosis induction: Natural way of colon cancer cells' inhibition. In *Proceedings* (Vol. 1, No. 10, p. 1041). MDPI. <https://doi.org/10.3390/proceedings1101041>
- Lalarukh, Hussain, S. M., Ali, S., Yilmaz, E., Zahoor, A. F., Javid, A., Alshehri, M. A., Shahzad, M. M., Naeem, A., Mahrukh. (2025). Microencapsulation: An Innovative Technology in Modern Science. *Polymers for Advanced Technologies*, 36(1), e70066. <https://doi.org/10.1002/pat.70066>
- Laurujisawat, P., Dumrongchai, T., Rodklontan, A., Chitprasert, P. (2025). Spray-Dried Microencapsulation of Probiotics With Genipin-Crosslinked Whey Protein Isolate for Enhanced Stability in Fortified Instant Cereal Drinks. *Journal of Food Science*, 90(5), e70257. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70257>
- Leroy, F., De Vuyst, L. (2004). Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry. *Trends in Food Science and Technology*, 15(2), 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.09.004>
- Li, J., Li, Y., Ding, Y., Huang, C., Zhang, Y., Wang, J., Wang, X. (2021). Characterization of a novel *Siphoviridae* *Salmonella* bacteriophage T156 and its microencapsulation application in food matrix. *Food Research International*, 140, 110004. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110004>
- Lu, J., Ge, Y., Zhu, X., Ma, Y., Chiou, B. S., Liu, F. (2025). Enhancing the stability of spray-dried

- vitamin A acetate: the role of synergistic wall materials in microencapsulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.14257>
- Mahdi, A. A., Mohammed, J. K., Al-Ansi, W., Ghaleb, A. D., Al-Maqtari, Q. A., Ma, M., Ahmed, M. I., Wang, H. (2020). Microencapsulation of fingered citron extract with gum arabic, modified starch, whey protein, and maltodextrin using spray drying. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 1125-1134. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.201>
- Maia, M. S., Domingos, M. M., de São José, J. F. B. (2023). Viability of probiotic microorganisms and the effect of their addition to fruit and vegetable juices. *Microorganisms*, 11(5), 1335. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051335>
- Marcial-Coba, M. S., Saaby, L., Knöchel, S., Nielsen, D. S. (2019). Dark chocolate as a stable carrier of microencapsulated *Akkermansia muciniphila* and *Lactobacillus casei*. *FEMS Microbiology Letters*, 366(2), fny290. <https://doi.org/10.1093/femsle/fny290>
- Mardani, M., Siahtiri, S., Besati, M., Baghani, M., Baniassadi, M., Nejad, A. M. (2024). Microencapsulation of natural products using spray drying; an overview. *Journal of Microencapsulation*, 41(7), 649-678. <https://doi.org/10.1080/02652048.2024.2389136>
- Martellet, M. C., Majolo, F., Cima, L., Goettert, M. I., de Souza, C. F. V. (2023). Microencapsulation of *Kluyveromyces marxianus* and *Plantago ovata* in cheese whey particles: Protection of sensitive cells to simulated gastrointestinal conditions. *Food Bioscience*, 52, 102474. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102474>
- Martins, P. M. M., Batista, N. N., Naves, J. A. O., Dias, D. R., Schwan, R. F. (2023). Use of microencapsulated starter cultures by spray drying in coffee under self-induced anaerobiosis fermentation (SIAF). *Food Research International*, 172, 113189. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113189>
- Mazár, J., Albert, K., Kovács, Z., Koris, A., Nath, A., Bánvölgyi, S. (2025). Advances in spray-drying and freeze-drying Technologies for the Microencapsulation of instant tea and herbal powders: The role of wall materials. *Foods*, 14(3), 486. <https://doi.org/10.3390/foods14030486>
- Melo, L. D., Oliveira, H., Pires, D. P., Dabrowska, K., Azeredo, J. (2020). Phage therapy efficacy: a review of the last 10 years of preclinical studies. *Critical Reviews in Microbiology*, 46(1), 78-99. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1729695>
- Mis-Solval, K. E., Jiang, N., Yuan, M., Joo, K. H., Cavender, G. A. (2019). The effect of the ultra-high-pressure homogenization of protein encapsulants on the survivability of probiotic cultures after spray drying. *Foods*, 8(12), 689. <https://doi.org/10.3390/foods8120689>
- Mohammadlinejad, S., Kurek, M. A. (2021). Microencapsulation of anthocyanins—Critical review of techniques and wall materials. *Applied Sciences*, 11(9), 3936.
- Muthukumarasamy, P., Holley, R. A. (2006). Microbiological and sensory quality of dry fermented sausages containing alginate-microencapsulated *Lactobacillus reuteri*. *International Journal of Food Microbiology*, 111(2), 164-169. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.036>
- Niamah, A. K., Al-Sahlaney, S. T. G., Ibrahim, S. A., Verma, D. K., Thakur, M., Singh, S., Patel, A. R., Aguilar, C. N., Utama, G. L. (2021). Electrohydrodynamic processing for encapsulation of probiotics: A review on recent trends, technological development, challenges and future prospect. *Food Bioscience*, 44, 101458. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101458>
- Paim, D. R., Costa, S. D., Walter, E. H., Tonon, R. V. (2016). Microencapsulation of probiotic jussara (*Euterpe edulis* M.) juice by spray drying. *LWT*, 74, 21-25. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.022>
- Peker, A. K., Guney, D., Sengun, I. (2024). The Use of both Free and Microencapsulated *Lactiplantibacillus plantarum* and *Pediococcus parvulus*

- in Cucumber Pickles. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03400-5>
- Peruzzolo, M., Ceni, G. C., Junges, A., Zeni, J., Cansian, R. L., Backes, G. T. (2025). Probiotics: Health benefits, microencapsulation, and viability, combination with natural compounds, and applications in foods. *Food Bioscience*, 106253. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106253>
- Praepanitchai, O. A., Noomhorm, A., Anal, A. K. (2019). Survival and behavior of encapsulated probiotics (*Lactobacillus plantarum*) in calcium-alginate-soy protein isolate-based hydrogel beads in different processing conditions (pH and temperature) and in pasteurized mango juice. *BioMed Research International*, 2019(1), 9768152. <https://doi.org/10.1155/2019/9768152>
- Pupa, P., Apiwatsiri, P., Sirichokchatchawan, W., Pirarat, N., Muangsin, N., Shah, A. A., Prapasarakul, N. (2021). The efficacy of three double-microencapsulation methods for preservation of probiotic bacteria. *Scientific Reports*, 11(1), 13753. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93263-z>
- Rajam, R., Subramanian, P. (2022). Encapsulation of probiotics: past, present and future. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 11(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s43088-022-00228-w>
- Ramirez-Olea, H., Herrera-Cruz, S., Chavez-Santoscoy, R. A. (2024). Microencapsulation and controlled release of *Bacillus clausii* through a novel non-digestible carbohydrate formulation as revolutionizing probiotic delivery. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24923>
- Rengadu, D., Gerrano, A. S., Mellem, J. J. (2021). Microencapsulation of *Lactobacillus casei* and *Bifidobacterium animalis* enriched with resistant starch from vigna unguiculata. *Starch-Stärke*, 73(7-8), 2000247. <https://doi.org/10.1002/star.202000247>
- Rojas-Muñoz, Y. V., Santagapita, P. R., Quintanilla-Carvajal, M. X. (2023). Probiotic encapsulation: bead design improves bacterial performance during in vitro digestion. *Polymers*, 15(21), 4296. <https://doi.org/10.3390/polym15214296>
- Saifullah, M., Shishir, M. R. I., Ferdowsi, R., Rahman, M. R. T., Van Vuong, Q. (2019). Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: A critical review. *Trends in Food Science and Technology*, 86, 230-251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.030>
- Santos Monteiro, S., Albertina Silva Beserra, Y., Miguel Lisboa Oliveira, H., Pasquali, M. A. D. B. (2020). Production of probiotic passion fruit (*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* Deg.) drink using *Lactobacillus reuteri* and microencapsulation via spray drying. *Foods*, 9(3), 335. <https://doi.org/10.3390/foods9030335>
- Sharifi, S., Rezazad-Bari, M., Alizadeh, M., Almasi, H., Amiri, S. (2021). Use of whey protein isolate and gum Arabic for the co-encapsulation of probiotic *Lactobacillus plantarum* and phytosterols by complex coacervation: Enhanced viability of probiotic in Iranian white cheese. *Food Hydrocolloids*, 113, 106496. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106496>
- Shishir, M. R. I., Xie, L., Sun, C., Zheng, X., Chen, W. (2018). Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters. *Trends in Food Science and Technology*, 78, 34-60. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.018>
- Souza, M., Mesquita, A., Veríssimo, C., Grosso, C., Converti, A., Maciel, M. I. (2022). Microencapsulation by spray drying of a functional product with mixed juice of acerola and ciriguela fruits containing three probiotic lactobacilli. *Drying Technology*, 40(6), 1185-1195. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1862182>
- Srivastava, S., Pandey, V. K., Dar, A. H., Shams, R., Dash, K. K., Rafiq, S. M., Zahoor, I., Kumar, S. (2024). Effect of microencapsulation techniques on the different properties of bioactives, vitamins and minerals. *Food Science and Biotechnology*, 33(14), 3181-3198. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01666-1>
- Ștefănescu, B. E., Nemes, S. A., Teleky, B. E., Călinoiu, L. F., Mitrea, L., Martău, G. A., Szabo, K., Mihai, M., Vodnar, D. C., Crișan, G. (2022).

- Microencapsulation and bioaccessibility of phenolic compounds of Vaccinium leaf extracts. *Antioxidants*, 11(4), 674. <https://doi.org/10.3390/antiox11040674>
- Sun, W., Nguyen, Q. D., Süli, B. K., Alarawi, F., Szécsi, A., Gupta, V. K., Friedrich, L. F., Gere, A., Bujna, E. (2023). Microencapsulation and application of probiotic bacteria *Lactiplantibacillus plantarum* 299v strain. *Microorganisms*, 11(4), 947. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040947>
- Talebzadeh, S., Sharifan, A. (2017). Developing probiotic jelly desserts with *Lactobacillus acidophilus*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(1), e13026. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13026>
- Tang, Z., Huang, X., Baxi, S., Chambers, J. R., Sabour, P. M., Wang, Q. (2013). Whey protein improves survival and release characteristics of bacteriophage Felix O1 encapsulated in alginate microspheres. *Food Research International*, 52(2), 460-466. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.037> Get rights and content
- Tayyarcı, E. K., Evran, S., Akin, P. A., Soykut, E. A., Boyacı, I. H. (2022). The use of bacteriophage cocktails to reduce *Salmonella* Enteritidis in hummus. *LWT-Food Science and Technology*, 154, 112848. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112848>
- Tidim, G., Guzel, M., Soyer, Y., Erel-Goktepe, I. (2024). Layer-by-layer assembly of chitosan/alginate thin films containing *Salmonella enterica* bacteriophages for antibacterial applications. *Carbohydrate Polymers*, 328, 121710. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121710>
- Tutun, S., Yurdakul, O. (2022). Enkapsülasyon ve Gıda Teknolojisinde Kullanımı. *Veteriner Farmakoloji ve Toksikoloji Derneği Bülteni*, 13(2), 99-119. <https://doi.org/10.38137/vftd.1096571>
- Udo, T., He, E., Qin, Z., Singh, R. K., Kong, F. (2025). Comparative evaluation of emulsification-based microencapsulation techniques with soy protein isolate for enhanced shelf-life and delivery of *Lactobacillus rhamnosus* GG. *Food Bioscience*, 106988.
- Wang, Y., Brahmia, A., Shahbaz, A., Sahramaneshi, H., Alkhalifah, T., Yang, J. (2025). A novel machine learning model for innovative microencapsulation techniques and applications in advanced materials, textiles, and food industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 224, 116082. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116082>
- Xiao, K., Pan, Q., Wu, Y., Ding, Y., Wu, Q., Zhang, J., Wang, Z., Liu, Z., & Wang, W., Wang, J. (2025). Application of a novel phage vB_CjeM_WX1 to control *Campylobacter jejuni* in foods. *International Journal of Food Microbiology*, 427, 110975. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110975>
- Yang, S., Wei, S., Wu, Y., Fang, Y., Deng, Z., Xu, J., Zhang, H. (2024). Encapsulation techniques, action mechanisms, and evaluation models of probiotics: Recent advances and future prospects. *Food Frontiers*, 5(3), 1212-1239. <https://doi.org/10.1002/fft2.374>
- Yao, M., Xie, J., Du, H., McClements, D. J., Xiao, H., Li, L. (2020). Progress in microencapsulation of probiotics: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2), 857-874. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12532>
- Yee, W. L., Yee, C. L., Lin, N. K., Phing, P. L. (2019). Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* NCFM incorporated with mannitol and its storage stability in mulberry tea. *Ciência e Agrotecnologia*, 43, e005819. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943005819>
- Yoha, K. S., Nida, S., Dutta, S., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2022). Targeted delivery of probiotics: perspectives on research and commercialization. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 14(1), 15-48. <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09791-7>
- Zhang, Z. L., Li, L. J., Sun, D., Wang, M., Shi, J. R., Yang, D., Wang, L., Zou, S. C. (2020). Preparation and properties of chitosan-based microspheres by spray drying. *Food Science and Nutrition*, 8(4), 1933-1941. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1479>
- Zhang, Z., Sun, C., Sun, X., Jin, Y., Yang, Z., Sun, Y., Wu, T. (2025). The Characteristics of

Lactobacillus plantarum, Microencapsulation Technology, Wall Materials and applications: A Review. *Food Reviews International*, 1-24. <https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2553686>

Zhong, H., Huang, W., Lin, K. T., Zhang, Q., Deng, Y., Zhang, R., Ma, R. (2025). A virulent phage vB_VpaP_R28Z infecting *Vibrio parahaemolyticus* with potential for therapeutic application. *BMC Microbiology*, 25(1), 433. <https://doi.org/10.1186/s12866-025-04133-x>

Zhu, Y. Y., Thakur, K., Zhang, W. W., Feng, J. Y., Zhang, J. G., Hu, F., Liao, C., Wei, Z. J. (2023). Double-layer mucin microencapsulation enhances the stress tolerance and oral delivery of *Lactobacillus plantarum* B2. *Food Hydrocolloids*, 141, 108678. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108678>