Veteriner Farmakoloji ve Toksikoloji Derneği Bülteni

Bulletin of Veterinary Pharmacology and Toxicology Association

e-ISSN: 2667-8381

ENKAPSÜLASYON VE GIDA TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI

Soner TUTUN[1a]
Özen YURDAKUL[2b]

[1]Sivas Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Sivas
[2]Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Burdur

ORCID[a]: 0000-0002-6208-476X
ORCID[b]: 0000-0001-7680-015X

***Sorumlu Yazar:** Soner TUTUN
E-Posta: sonertutun@cumhuriyet.edu.tr

Geliş Tarihi: 31.03.2022
Kabul Tarihi: 26.08.2022

13 (2): 99-119, 2022
DOI: 10.38137/vftd.1096571

ÖZET. Enkapsülasyon yönteminin kullanımı son yıllarda gıda endüstrisi alanında önemli bir konuma gelmiştir. Gıda işleme prosesinde kolaylıkla bozulabilen önemli gıda bileşenleri enkapsülasyon yöntemiyle korunabilmektedir. Kapsüllenen bu bileşenler, nem, sıcaklık, pH, katkı maddeleri gibi faktörlerden etkilenmediği için daha uzun süre muhafaza edilebilir duruma gelir. Enkapsülasyon işleminde birçok yöntem bir arada uygulanmaktadır. Kapsülleri oluşturmak için, püskürtmeyle kurutma ve soğutma, ekstrüzyonla kaplama, akışkan yatak kaplama, lipozom yakalama, koaservasyon, ekstrüzyon ve emülsifikasyon işlemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Enkapsülasyon işlemi ile gıda bileşenlerine doğal ya da yapay tatlandırıcılar, probiyotikler, prebiyotikler, mineraller, vitaminler ve birçok katkı maddesi eklenebilmektedir. Enkapsülasyon teknolojisinde ekipmanlarının geliştirilmesi, prosedürlerinin netleştirilmesi, kapsüllenecek maddelerin enkapsülasyonu için toksik olmayan materyallerin seçilmesi, sindirim sisteminin pH'sına uyarlanmış polimerlerden kapsüller geliştirilmesi ve kapsüllenmiş maddelerin salım mekanizmalarının belirlenmesi gibi zorluklar bulunmaktadır. Enkapsülasyon yöntemlerinin uygulanmasında karmaşık süreçlere sahip olması ve farklı kaplama materyallerin kullanılmasından dolayı yüksek üretim maliyeti olması da sektörlerde kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Maliyetler, kullanılan yönteme ve materyale bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Konu ile ilgili çalışmaların sayısının arttırılması ve üretim maliyetlerinin azaltılması sonucunda bu faydalı uygulamanın pratik olarak kullanılmasında etkili olacağı düşünülmektedir. Bu derlemede enkapsülasyon yöntemi, kullanılan yöntemler ve çeşitli gıdalarda kullanımı ile ilgili güncel bilgiler yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gıda, Enkapsülasyon, Mikroenkapsülasyon yöntemleri, Gıda bileşenleri, Kaplama materyali.

ENCAPSULATION AND ITS USE IN FOOD TECHNOLOGY

ABSTRACT. Encapsulation technique has gained popularity in the food industry in recent years. Important food components that are easily perishable in the food processing process can be protected by this technique. Since these encapsulated components are not affected by factors such as humidity, temperature, pH, additives, they can be stored for a longer period of time. Many techniques are involved in the encapsulation process. Spray drying and cooling, extrusion coating, fluidized bed coating, liposome capture, coacervation, extrusion and emulsification are frequently used to form capsules. With the encapsulation process, natural or artificial sweeteners, probiotics, prebiotics, minerals, vitamins and many additives can be added to food components. There are challenges in encapsulation technology such as developing equipment, clarifying procedures, selecting non-toxic materials for encapsulation developing capsules from polymers adapted to the pH of the digestive tract, and determining the release mechanisms of encapsulated substances. High production costs due to the use of different coating materials and complex processes of make the encapsulation techniques adversely affect their use in the sectors. Costs can vary widely depending on the technique used and the material of the product. Increasing the number of studies on this technology and reducing production costs could be effective for this beneficial application to be used more effectively in practice. In this review, up-to-date information about the encapsulation method, the techniques used, and its use in various foods are given.

Keywords: Food, Encapsulation, Microencapsulation methods, Food components, Coating material.

Makale atıf

Tutun, S. ve Yurdakul, F (2022). Enkapsülasyon ve gıda teknolojisinde kullanımı, Veteriner Farmakoloji ve Toksikoloji Derneği Bülteni , 13 (2), 99-119. DOI: 10.38137/vftd.1096571

GİRİŞ

Tüketicilerin değişen hayat tarzları ve gıda konusunda billinçlenmesi beslenme tercihlerinde önemli değişiklere sebep olmuştur. Bu değişim yüksek oranda doğal antioksidan, çoklu doymamış yağ asitleri, vitamin ve mineral içeren gıdaları tüketme yönünde olmaya başlamıştır. Ayrıca, son zamanlarda probiyotik ve prebiyotiklerin içeren gıdaların tüketiminde önemli ölçüde artış gözlenmiştir. Bahsedilen çeşitli gıda katkıları içeren gıdalara yönelişin artması, gıda sanayisini yenilikçi tekniklerle ideal besin bileşenlerini içeren fonskiyonel gıdalar üretmeye zorlamaktadır. Bu tür fonksiyonel gıdaların üretiminde bileşenlerinin stabilitesini, çeşitli gıda matrislerinde tutulmasını ve gastrointestinal sistemden daha iyi emilmesini sağlayan yöntemlerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir (Chew ve ark., 2019). Bu yöntemlerden en önemlisi aktif maddeleri bir taşıyıcı malzeme içinde hapsetme işlemi olarak bilinen kapsüllemedir ve bu yöntem ile biyoaktif moleküllerin ve canlı mikroorganizmaların gıdalara eklenmesi daha elverişli hale getirilir. Kapsülleme, çekirdek malzeme çevresinde ısı, enzimler, oksijen, ışık, pH gibi dış çevresel faktörlere karşı, bu çekirdek malzemerlerin manipülasyonunu, taşınmasını, depolanmasını ve uygulanmasını kolaylaştıran fiziksel bir bariyer ve koruyucu tabaka sağlar (Sagis, 2015).

Doğal antioksidanları, doymamış yağ asitlerini, probiyotikleri, biyoaktif bileşikleri ve vitaminleri içeren gıdalar, temel fonksiyonel gıdalar arasında yer alır. Bu bileşenler, gıda ürünlerinin besin değerini ve işlevselliğini iyileştirmek için kullanılmaktadır (Dias ve ark., 2017). Mikro ve nano kapsülleme, bu bileşenler ile fonskiyonel gıda oluşturmadaki bazı sorunları çözmek için hızla gelişmektetir. Sadece fonksiyonel gıda da değil, gıda endüstrisinin zorluklarına yeni çözümler sunmak için de kullanılmaktadırlar (Ezhilarasi ve ark., 2013).

Gıda ürünlerinde enkapsülasyon uygulamalarında biyoaktif bileşiklerin ve probiyotiklerin kapsüllenmesini desteklemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. En uygun kapsülleme yönteminin seçimi, esas olarak çekirdek malzemesinin tipine ve kapsüllemenin uygulanacağı son ürünün özelliklerine bağlıdır. Ayrıca, kaplama materyali seçimi ve kapsüllenecek çekirdek materyalinin özellikleri kapsülleme verimliliğini büyük etkiler (Gharsallaoui ve ark., 2007).

Kaydedilen birçok gelişmeye rağmen enkapsülasyon teknolojisinde ekipmanların geliştirilmesi, prosedürlerin netleştirilmesi, toksik olmayan materyallerin seçilmesi, sindirim sistemi pH'sına uyarlanmış polimerlerden kapsüller geliştirilmesi ve kapsüllenmiş maddelerin salım mekanizmalarının belirlenmesi gibi zorluklar bulunmaktadır (Favaro-Trindade ve ark., 2011). Bu yöntemlerde diğer bir zorluk ise teknolji maliyetleridir. Ürün geliştirme hem zaman hem de finansal kaynak gerektirdiğinden, maddelerin enkapsülasyon aşaması, gıda işlemeye ek maliyetler getirebilmektedir. Maliyetler, kullanılan tekniğe ve ürünün hacmine bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir (Rokka ve Rantamäki, 2010). Örneğin doğal polimerlerin (polisakkaritler ve proteinler) kullanıldığı kapsülleme diğerlerine nazaran daha pahalıdır (Anal ve Singh, 2007). Bu derlemenin amacı enkapsülasyon teknolojisinde kullanılan yöntemler ve gıda endüstrisindeki kullanım alanları hakkında bilgi vermektir.

ENKAPSÜLASYON NEDİR?

Enapsülasyon, aktif maddeleri bir taşıyıcı malzeme içinde tutmak için bir işlem olup biyoaktif moleküllerin ve canlı hücrelerin gıdalara verilmesini sağlamada kullanılan yararlı bir yöntemdir (Nedovic ve ark., 2011). Bu yöntemin amacı aktif olarak kullanılacak çekirdek malzemelerin nanometrik, mikrometrik veya milimetrik ölçülerde kaplama materyali içinde tutulmasını sağlamaktır (Rodrigues ve ark., 2018). Öte yandan gıda endüstrisinde gıda bileşenlerini, esansiyel yağları, aromatik hidrokarbonları, enzimleri, mikrobiyal metabolitleri ve mikroorganizmaları olumsuz dış koşullara karşı koruyan bir yöntem olarakta geçmektedir. Bu kapsamda asit oluşturan maddeler, aroma maddeleri, tatlandırıcılar, renklendiriciler, lipidler, vitaminler ve mineraller, enzimler ve mikroorganizmalar da enkapsüle edilebilmektedir (Desai ve Park, 2005).

Enkapsülasyon Yöntemlerinde Kullanılan Kaplama Materyalleri

Katı, sıvı veya farklı tür ve özelliklerdeki gazları kapsüllemek için birçok madde kullanılabilir (Wandrey ve ark., 2010). Bir kapsülleme malzemesinin seçiminde; kapsüllemenin nihai ürüne sağlaması gereken işlevsellik, kapsüllerin konsantrasyonu, salınım tipi, stabilite gereksinimlerini sağlayabilme, mali koşullar ve biyolojik olarak parçalanıp iç faz ile çevresi arasında bir bariyer

oluşturabilme en önemli kriterlerdir (Nedovic ve ark., 2011).

Malzemeler doğal olmalarının dışında kaplama materyalleri için gerekli görülen bazı özellikler aşağıda belirtildiği gibi sıralanmaktadır;

- Çevre koşullarına karşı maksimum koruma sağlamalı
- Çeşitli koşullar altında işleme veya depolama sırasında aktif maddeleri kapsül yapısı içinde tutabilmeli
- Kapsüllenmiş çekirdek materyal ile reaksiyon göstermemeli
- Yüksek konsantrasyonda iyi reolojik özelliklere sahip olmamalıdır (Nedovic ve ark., 2011). Bunların yanı sıra ideal bir kaplama materyali ekonomik olmalı, tam bir koruma sağlamalı, toksik olmamalı ve pratikte kolay uygulanabilir olmalıdır (Qi ve ark., 2006).

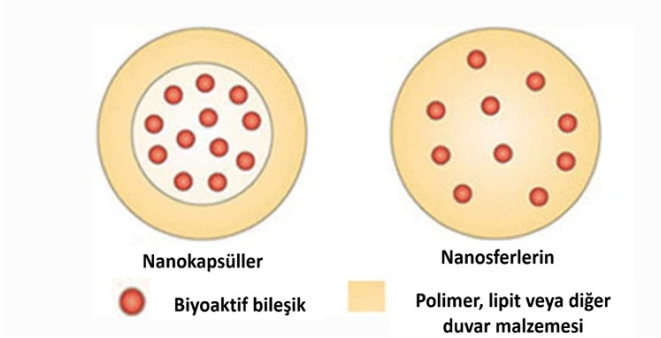
Gıda sektöründe kapsülleme malzemesi olarak en çok kullanılanlar arasında nişasta ve türevleri, amiloz, amilopektin, dekstrinler, maltodekstrinler, polidekstroz ve selüloz ile bunların türevleri olan polisakkaritler bulunmaktadır. Bitki ekstraktları ile zamkları, galaktomannanlar, pektinler ve soya fasulyesinin çözünür polisakkaritler ise daha nadir kullanılmaktadır (de Vos ve ark., 2010). Bunların dışında karajenan ile aljinat gibi deniz özleri, dekstran, kitosan, ksantan ve gellan gibi polisakkaritlerden de yararlanılmaktadır. Doğal ve modifiye edilmiş polisakkaritlerin yanı sıra proteinler ve lipidlerin de kapsülleme için kullanılması uygundur. En yaygın kullanılan proteinler kazein, peynir altı suyu proteinleri, jelatin ve glutendir. Gıda uygulamalarına uygun lipit malzemeler arasında ise yağ asitleri, mumlar, gliseridler, fosfolipidler ve inorganik olarak da parafin kullanılmaktadır. Mumlar arasında ise karnauba, kandelya ve balmumu gibi mumlar tercih edilmektedir (Wandrey ve ark., 2010).

Aljinatlar ucuz ve non-toksik olmalarından dolayı tercih edilen polisakkaritler olmakla birlikte enkapsülasyon verimlerinin oldukça düşük olduğu bildirilmektedir. Bundan dolayı aljinatlar, nişasta ya da kitosanla kombine edilerek çevre şartlarına daha dirençli hale getirilmektedir (Krasaekoopt ve Watcharapoka, 2014). Çeşitli et ürünlerinin üretiminde kullanılacak probiyotiklerin enkapsüllenmesi amacıyla genellikle aljinat, arap zamkı ve buğday proteinleri kullanılmaktadır (Pérez-Chabela ve ark., 2013; Barbosa ve ark., 2015).

ENKAPSÜLASYON ÇEŞİTLERİ

Nanoenkapsülasyon

Nanokapsülasyon, 10 ile 1000 nanometre (nm) (0,01µm-1µm) boyutlarında bulunan küçük parçacıklardır (Rao ve Geckeler, 2011). Nanoenkapsülasyon, maddeleri minyatür bir şekilde kapsüllemek için uygulanan bir teknoloji olarak tanımlanır ve nano ölçekli aralıktaki biyoaktif paketlemeyi ifade eder (Lopez ve ark., 2006). Nanoenkapsülasyon işleminin amacı, kullanılacak biyoaktif bileşikleri (polifenoller, mikro besinler, enzim, antioksidanlar ve nutrasötikler) kapsül içerisinde korumak ve ayrıca hedeflenen bölgelerde kontrollü salınımını sağlamaktır (Gouin, 2004). Enkapsülasyon uygulamasında çekirdek malzemenin biyoyararlanımı daha çok partikül boyutuyla alakalı olduğundan dolayı makrokapsülasyon uygulaması yerine genellikle mikrokapsülleme veya nanokapsülleme yöntemleri kullanılmaktadır. Aralarında biyoyararlanımı en yüksek olan ve en kontrollü salınımı sağlayan nanokapsülasyondur (Hughes, 2005; Mozafari ve ark., 2006). Şekil 1.'de nanokapsüllerin ve nanosferlerin şematik yapısı gösterilmektedir (Orive ve ark., 2009).



Şekil 1. Nanokapsüller ve nanosferlerin şematik yapısı (Orive ve ark., 2009).

Nutrasötikler sağlığın koruması amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Nutrasötik bileşikler, suda çözünürlüklerine göre lipofilik ve hidrofilik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hidrofilik bileşikler suda çözünür ancak lipitlerde ve organik çözücülerde çözünmez. Lipofilik bileşikler ise lipitlerde ve organik çözücülerde çözünür ancak suda çözünmez. Nutrasötiklerin etkili olabilmesi için biyoaktif bileşenlerin hedeflenen bölgelerde salımlanmasına kadar güzel bir şekilde korunması gerekmektedir. Nanokapsüllenmiş hidrofilik nutrasötiklerin bazıları askorbik asit ve polifenollerdir (Chen ve ark., 2006; Dube ve ark., 2010). Nanokapsüllenmiş lipofilik nutrasötikler ise likopen, beta-karoten, lutein, fitosteroller ve dokosaheksaenoik asitlerdir (Leong ve ark., 2011). Lipid veya doğal biyobozunur polimer bazlı kapsüller gibi nanotaşıyıcı gıda sistemleri de en çok bu kapsülleme yöntemi için kullanılır (Chen ve ark., 2006). Nano dağıtım sistemlerinin kapsüllenmesi amacıyla albümin, jelatin, aljinat, kolajen, kitosan ve α-laktalbümin gibi doğal polimerler kullanılmaktadır (Reis ve ark., 2006). Bununla birlikte hem hidrofilik hem de lipofilik bileşiklerin kapsüllenmesi için emülsifikasyon, koaservasyon ve süper kritik akışkan tekniği yöntemleri kullanılmaktadır (Chong ve ark., 2009).

Mikroenkapsülasyon

Mikrokapsülleme teknolojisi, çekirdek malzeme olarak kullanılacak bileşiğin 0,2-5000 µm kadar küçük bir ortalama çapa sahip mikro küre veya mikrokapsül olarak bilinen küçük bir küre içinde kapsüllenmesi işlemi olup genellikle elde edilen mikrokapsüllerin çapı 3 ile 800 µm arasında değişmektedir (Dubey ve ark., 2009; Meena ve ark., 2011). Mikrokapsülasyon gıda bileşenlerinin korunması, stabilizasyonu ve yavaş salınımı için kullanılan bir teknolojidir. Bu yöntemde kaplama materyalleri genellikle nişasta ve türevleri, proteinler, zamklar, lipitler veya bunların herhangi bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Gıda bileşenlerini kapsülleme yöntemleri arasında püskürtmeyle kurutma, dondurarak kurutma, akışkan yatak kaplama, ekstrüzyon, emülsiyon ve koaservasyon yöntemleri yer alır (Shahidi ve Han, 1993). Mikrokapsülasyon sayesinde aktif bileşenler oksijene, ısıya, neme, ışığa ve lipid oksidasyonuna karşı korunarak raf ömürleri iyileştirilebilinir (Charve ve Reineccius, 2009). Bu yöntem gıda sektörünün yanı sıra farmakolojik preparatlarda da kullanılmaktadır. İlaç, enzim, vitamin ve pestisit gibi birçok farklı etken madde, poli (etilen glikol), poli (metakrilat), poli (stiren), selüloz, poli (laktit), poli (laktit-ko-glikolid) gibi çeşitli polimerik ve polimerik olmayan malzemelerden yapılan mikro balonlar veya mikrokapsüller içinde başarıyla kapsüllenmektedir. Bu nedenle farmakoljik ve kozmetik ürünlerde mikrokapsülleme teknolojisine artan bir ilgi vardır (Dubey ve ark., 2009).



Şekil 2. Mikrokapsüllerin farklı tipleri (Dubey ve ark., 2009).

Mikrokapsüller küre şeklinde olup içinde bulunan madde iç faz, çekirdek veya dolgu materyali olarak adlandırılırken dış kısmı ise duvar, kabuk veya kaplama materyali olarak adlandırılmaktadır (Gharsallaoui ve ark., 2007). Mikrokapsüller, Şekil 2'de gösterildiği gibi tek çekirdekli, çok çekirdekli ve matriks tipleri olarak üç temel kategoriye ayrılmaktadır. Tek çekirdekli mikrokapsüller, kapsül içinde tek bir oyuk bölmeye sahiptir. Çok çekirdekli

mikrokapsüller ise kabuk içinde birkaç farklı boyutta bölmeler içermektedir. Matriks tipi mikrokapsül ise kabuk materyalinin matrisine entegre edilmiş aktif bileşenler içermektedir (Dubey ve ark., 2009). Mikroenkapsülasyon işleminde yeni bir ürün meydana getirilirken sıvı formdaki bir madde katı hale dönüştürülebilmesinin yanısıra ürünün fiziksel özelliklerini değiştirerek gıdada duyusal kalite arttırmaktadır. Bu amaçla sıvı formda ki bir madde serbest akış sağlanarak toz haline dönüştürülebilir (Nedovic ve ark., 2011).

Makroenkapsülasyon

Makroenkapsülasyon, difüzyon çemberi içinde büyük bir kütle içinde çekirdek materyallerin kapsüllenmesi olarak tanımlandırılırken mikrokapsülleme, difüzyon odası içinde tek veya küçük grupların kapsüllenmesini içerecek şekilde tanımlanır (Qi ve ark., 2004). Makroenkapsülasyon, genellikle 5000 µm'den büyük boyutlara sahiptir (King, 1995). Makroenkapsülasyon zararlı atıkları azaltmak için kullanılan bir yöntemtir. Bu bağlamda tehlikeli olan bu atık kaplama materyali içinde hapsedilmiştir. Bu kaplama materyalleri su ve havayı geçirmemektedir. Stabilize maddenin zaman içerisinde nem, kuruma ve donma gibi gibi etmenlerle bozulduğu ve kirleticilerin ayrılarak sızıntı suyuna karıştığı görülmüştür. Bu yüzden kütle bütünlüğü korunamazsa makroenkapsülasyon tek başına yeterli değildir (Lagrega ve ark., 1994).

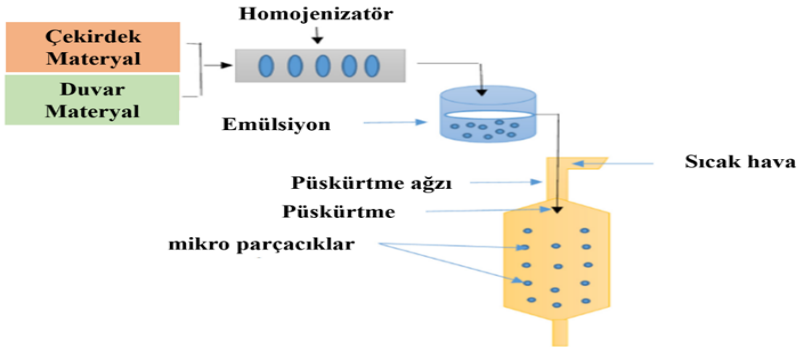
ENKAPSÜLASYON YÖNTEMLERİ

Püskürterek Kurutma ve Soğutma

Püskürterek kurutma, atomize edilmiş damlacıkların sıcak hava ile karşılaştırılarak termodinamik yöntemler yoluyla mikro partikül oluşumuna yol açan bir emülsiyon veya çözeltinin atomizasyonuna dayanır. Mikropartiküller genellikle bir siklonda toplanıp hava sisteminden daha düşük bir sıcaklık ve yüksek nem ile çıkar. Püskürtmeli kurutma; uçucu yağlar, doğal renklendiriciler, vitaminler ve probiyotikler gibi aktif bileşenlerin mikrokapsüllenmesi için nispeten ucuz, hızlı ve verimli bir yöntemdir (Garti ve McClements, 2012). Bu yöntemin tercih edilme sebebi aşağıda sıralanmıştır (Kailasapathy, 2009).

- Ürünlerde su miktarının ve su aktivitesinin azaltılması
- Mikrobiyolojik stabilitenin sağlanması.
- Kimyasal bozulmanın önlenmesi.
- Depolama maliyetinin azaltılması.
- Ürün özelliklerinin korunması.

Bu yöntemde en yaygın olarak kullanılan enkapsülan materyaller süt proteinleri ve bitki proteinleri ile arap zamkı, maltodekstrin, modifiye nişasta, inülin ve kaju sakızı gibi polisakkaritlerdir (Dias ve ark., 2017). Bu yöntem, çekirdek materyalinin koruyucu özelliği olan bir matriks içinde hapsedilmesi ve materyalin kaplama çözeltisindeki dispersiyon ve emülsiyonuyla hazırlanmaktadır (Bansode ve ark., 2010). Kaplama materyali ve çekirdek materyal önce kurutma bölümüne püskürtülür ve ardından dekanter santrifüj ile ısınan hava alınarak materyal kurutulur (Gökmen ve ark., 2012). Püskürterek kurutma ile üretilen ürünlerin başında süt tozu üretimi gelmektedir. Kapsülün özünü süt yağı oluştururken bu süt yağını oksidasyona karşı koruyan ise süt proteinleni ve laktoz karışımıdır. Camsı yapının oluşumundan karbonhidratlar sorumlu iken film oluşturma ve emülsifikasyondan ise proteinler rol almaktadır (Gharsallaoui ve ark., 2007).



Şekil 3. Püskürtmeyle kurutma ile kapsülleme işleminin şematik gösterimi (Mohammed ve ark., 2020).

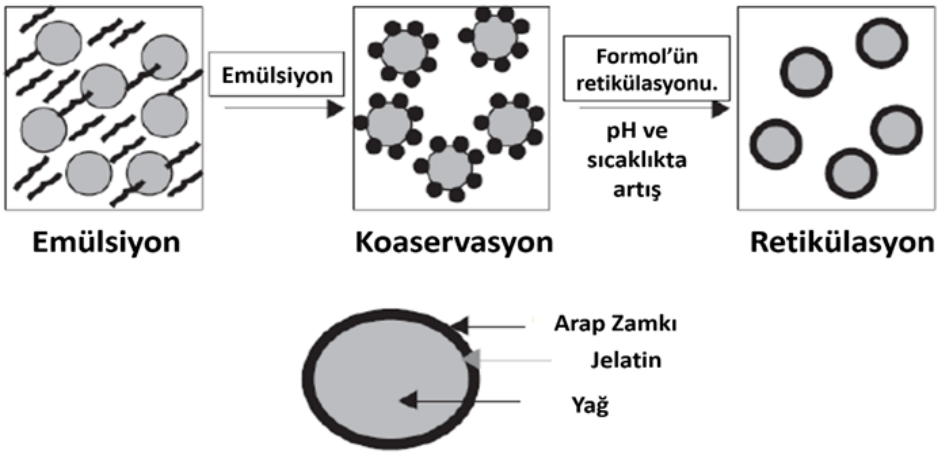
Püskürterek soğutma, püskürterek kurutmanın tersine aktif madde ve erimiş lipid matriks malzemesinin karıştırılarak lipidin erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta atomizasyonuna dayanır (Alvim ve ark., 2016). Püskürterek soğutma yönteminde genellikle hidrofilik olan aktif bileşenlerin mikrokapsüllenmektedir. Kaplama materyali olarakta çeşitli erime noktalarına sahip yenilebilir lipitler kullanılmaktadır. Elde edilen besin matriksi sindirim sistemine geldikten sonra yağlar sindirilir ve biyoaktif elementler katı lipid mikropartiküllerinden bağırsağa salınır. Bu sayede mikrokapsüllenmiş bu ürünün biyoyararlanımları artmış olur (Paucar ve ark., 2016). Genellikle kaplama materyali olarak mumlar, yağ asitleri, monomerler, suda çözünen ve çözünmeyen polimerler kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2006).

Bu yöntemin avantajları; aroma kaybının çok az olması, elde edilen ürünün rekonstitüsyon özelliğinin iyi olması ve eklendiği gıda maddesinde iyi çözünmesidir (Burgain ve ark., 2011). Dezavantajları ise işlemlerinin uzun sürmesi ve fazla enerji kullanımından dolayı püskürterek kurutmadan 30 ile 50 kat fazla maliyetli olmasıdır (Semyonov ve ark., 2010).

Koaservasyon

Koaservasyon yöntemi, ilk olarak Bungenberg de Jong tarafından elektrostatik etkileşimler sayesinde bulunmuştur. Bu elektrostatik etkileşimler hidrojen bağı, hidrofobik etkileşimler ve sulu çözeltideki iki zıt yüklü polimer arasında meydana gelen polarizasyonla şekillenir. Bu polarizasyonla birlikte açığa çıkan elektrostatik etkileşim sayesinde bir sıvı-sıvı faz ayrımı meydana gelmektedir (Boral ve Bohidar, 2010). Bu yöntemde meydana gelen sıvı- sıvı fazlardan biri polimer açısından zengin iken diğeri çözücü açısından zengindir (De Kruif ve ark., 2004). Bu yöntemde çözücünün ortamdan çekilmesi sonucu iki fazlı çökmüş koaservant oluşur ve bu koaservant ortamın pH'sı veya sıcaklığı değişse bile hiçbirşekilde çözücü özellik kazanmaz. Daha sonra iki fazlı koaservanta elektrolit bileşiğin eklenmesiyle çekirdek materyal etrafında zıt yüklü polielektrolit çözeltilerin karıştırılması sonucu kabuk materyal oluşumu sağlanır (Gouin, 2004).

Koaservasyon yöntemi, basit koaservasyon ve karmaşık koaservasyon olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Basit koaservasyonda yalnızca bir tip kolloid çözünen madde kullanılmaktadır. Böylece daha az hidrofilik olan bir kolloidal dispersiyona daha güçlü bir hidrofilik bileşik eklenmiş olur. Karmaşık koaservasyonda ise birden fazla kolloid kullanılmaktadır. Karmaşık koaservasyonda her iki faz da suda çözünen bir polianyon ve bir polikatyon arasında meydana gelen iki zıt yüklü kolloidin etkileşiminden oluşmaktadır (Huang ve ark., 2006). Karmaşık koaservasyon, çözeltinin pH'ından önemli ölçüde etkilenmektedir. İzoelektrik noktasının altındaki pH değerlerinde katyonik olan jelatin, kapsüllemeye uygun kompleks koaservatlar oluşturmak için arap zamkı gibi çeşitli doğal ve sentetik anyonik suda çözünebilirr polimerler ile etkileşime girerek mikrokapsülleri oluşturur (Huang ve ark., 2006). Koaservasyon yönteminin yapımı Şekil 4'teki gibidir (Madene ve ark., 2006).



Şekil 4. Karmaşık Koaservasyon Yönteminin Prensibi (Madene ve ark., 2006).

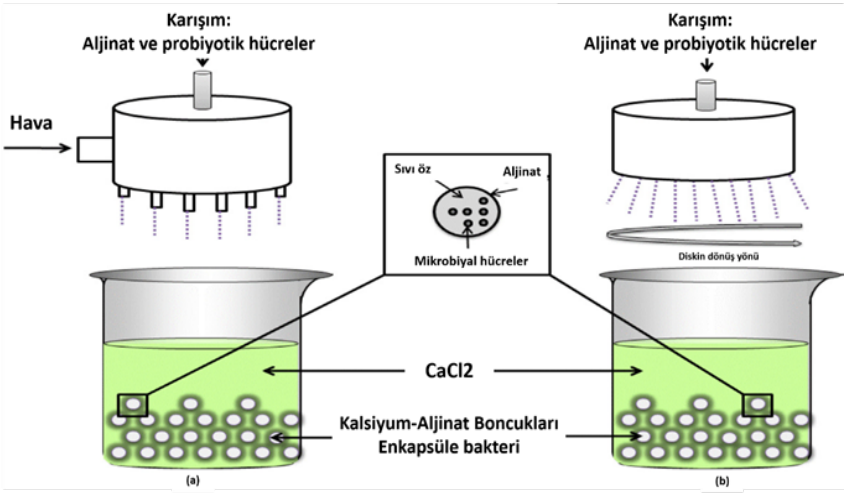
Karmaşık koaservasyon oluşturmak için çeşitli makromoleküler sistemler kullanılmıştır. Karmaşık koaservasyon yöntemi ile en çok jelatin ve akasya sakızı kullanlmaktadır (Prata ve ark., 2008). Heparin/jelatin, jelatin/karboksimetil selüloz, laktik asit ile glikolik asidin polilaktitleri/kopolimerleri, polivinil alkol, hidroksil propilmetil selüloz, bitki proteinleri, poliüretan gibi diğer sistemler de koaservasyon için kullanılmaktadır (Katona ve ark., 2010). Çekirdek materyal polimerler ile uyumlu olmalı ve koaservasyon ortamında çözünmemelidir. Koeservasyon yönteminde yüksek sıcaklık ve organik çözeltiye gerek olmadığından yapımı çok basit ve maliyeti oldukça düşüktür. Bu yöntem aromalı yağların kapsüllenmesinde kullanılmaktadır (Oliveira ve ark., 2007). Son yıllarda ise aroma ve uçucu yağ mikrokapsülleri, gıda, tekstil, tarım ve eczacılık alanında çok sayıda potansiyel pratik uygulama alanı bulmuştur (Xiao ve ark., 2014).

Ekstrüzyon yöntemi

Ekstrüzyon, probiyotik bakteriler ile aroma maddelerinin kapsüllenmesi için uygulanan fiziksel bir yöntemtir. Bu yöntemde kullanılan cihazda havayla çalışan iğneli disk bölümü ile damlacık jenaratörü bulunmaktadır. Bu yöntemde kaplama materyali olarak genellikle aljinat ve karrajenan gibi hidrokolloidler, sakkaroz, maltodekstrin, glukoz şurubu ve gliserin kullanılmaktadır (Arshady, 1993; Krasaekoopt ve ark., 2003). Yöntemin yapılışında uçucu aroma materyalleri bariyer özellikteki hidrokolloidler içine yavaş bir şekilde difüze edilerek enkapsülasyonu sağlanmaktadır. Bu doğrultuda oksijene karşı bariyer oluşturulmuş ve jelatinizasyon işlemi ile hidrokolloidler çapraz bağlanarak kaplanan biyoaktif bileşenler daha stabil bir yapı kazanmış olurlar (Gouin, 2004). Jelatinasyon işlemi sonrasında mikroenjeksiyon ile biyoaktif bileşenler damlatılarak mikrokapsüllerin oluşturulması sağlanmış olur (Augustin ve ark., 2001).

Probiyotik bakterilerin enkapsülasyonunda kaplama materyali olarak en çok sodyum aljinat kullanılmaktadır. Kaplama materyalini sertleştirmek amacıyla ise sodyum aljinat ve çapraz bağlayıcı olarak $CaCl_2$ çözeltisi birlikte kullanılmaktadır. İsteğe bağlı olarak aljinat-kalsiyum klorür yerine jelatin-potasyum klorür de kullanılabilmektedir (Zuidam ve Shimoni, 2010). Kalsiyum-aljinat kapsülleri $CaCl_2$ çözeltisinin damlatılması ile elde edilen iyonik bir jelatinizasyondur. Bunun yanı sıra ters iyonik jelatinizasyon işlemi ile de jelatinasyonun tersine $CaCl_2$ çözeltisine aljinat çözeltisine damlatılarakta bu işlem yapılabilmektedir (Burgain ve ark., 2011).

Elde edilen mikrokapsül boyutları uygulanan işlem parametrelerine, ekstrüzyon cihazındaki tekli ve çoklu iğne düzeneği ile püskürtme işlemine göre değişiklik göstermektedir. Püskürtme işleminde sabit, dönerli ve titreşimli diskler kullanılmaktadır (Soukoulis ve Bohn, 2018). Ekstrüzyon işleminde en iyi kapsülasyonun çoklu iğne ve dönerli disk püskürtücü kullanılarak yapıldığı bildirilmektedir (Kailasapathy, 2002).



Şekil 5. Ekstrüzyon yönteminin uygulanması (Burgain ve ark., 2011).

Ekstrüzyon yönteminin uygulandığı cihazın şematik görüntüsü Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere $CaCl_2$'e bir hidrokolloid olan aljinat eklenmektedir. Elde edilen $CaCl_2$-aljinat çözeltisi de iğneli disk ve püskürtme amacıyla damlacık jenatörüyle çözelti damlatılmaktadır (Burgain ve ark., 2011).

Ekstrüzyon, probiyotik bakterilere zarar vermeden kullanılan basit ve ucuz bir yöntemdir (Krasaekoopt ve ark., 2003). Yöntem, zararlı çözücüler içermez ve hem aerobik hem de anaerobik koşullar altında yapılabilir. Aroma maddelerinin ekstrüzyon yöntemi ile enkapsülasyonu sonucunda oksidasyona karşı oldukça dayanıklı mikrokapsüller elde edilebilmektedir. Bu yöntem ile enkapsüllenen aroma maddelerinin kapsülleri oksidasyona karşı oldukça dayanklı olması en büyük avantajıdır (Koç ve ark., 2010). Bu yöntemin en önemli dezavantajı ise mikrokapsüllerin yavaş oluşması nedeniyle büyük ölçekli üretimlerde kullanımının zor olmasıdır (Burgain ve ark., 2011).

Emülsifikasyon Yöntemi

Emülsifikasyon yöntemi genellikle lipofilik bileşiklerin enkapsülasyonunda tercih edilmektedir (Sagalowicz ve Leser, 2010). Bu yöntemde kaplama materyali olarak aljinat, pektin ve karrajenan gibi hidrokoloidler kullanılmaktadır (De Vos ve ark., 2010).

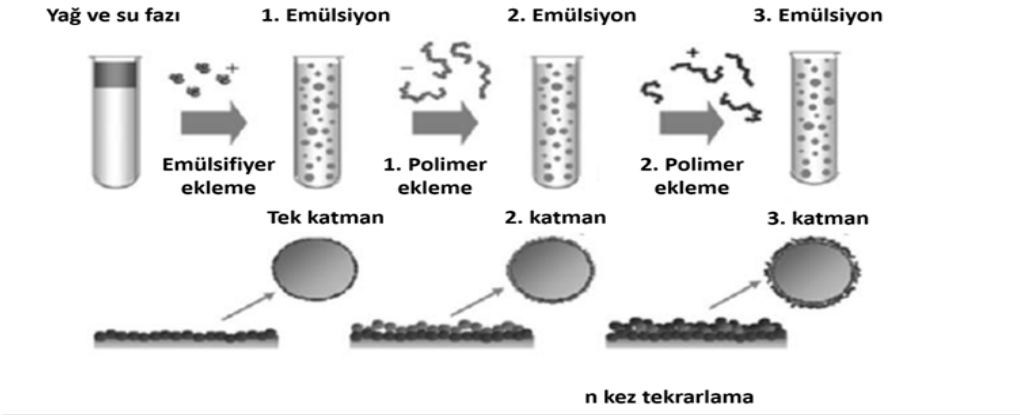
Bu emülsifikasyon yöntemi temel olarak 3'e ayrılmaktadır. Bunlar;

1. Tek katmanlı membran emülsiyon,
2. Çok katmanlı membran emülsiyon,
3. Katı-sıvı emülsiyon yöntemleridir.

Tek katlı membran emülsiyonunda suda çözünen yağ (S/Y) ve yağda çözünen su (Y/S) emülsiyonları oluşturulur. Çok katmanlı emülsiyon oluşumunda ise su/yağ/su (S/Y/S) veya yağ/su/yağ (Y/S/Y) emülsiyonları oluşturulur (Fang ve Bhandari, 2010). Bu yöntemde genellikle suya soya, ayçiçeği, kanola ve mısır yağı gibi sıvı yağlar eklenmektedir. Elde edilen bu karışım yağda su emülsiyonu elde edilebilmesi için karıştırılır. Destekleyici materyal olarak genellikle κ-karragenan, keçiboynuzu zamkı, selüloz asetat, fitalat, aljinat ve jelâtin kullanılmaktadır. Mikrokapsüllerin boyutu iç faz partikül boyutuna bağlıdır. Mikrokapsül 25 μm ile 2000 μm arasında değişmekte olup sıvı çözeltiden ayrılması amacıyla filtrasyon veya buharlaştırma işlemi uygulanmaktadır (Krasaekoopt ve ark., 2003).

Emülsifikasyon yöntemi kolay uygulanabildiği için gıda ve farmasötik kimya gibi birçok alanda tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. (Kailasapathy, 2009). Emülsifikasyon yöntemi uygulanarak elde edilen ürünlerin yüksek sıcakta depolama, pH ve iyonik kuvvet gibi değişimler sonucunda zayıf fiziksel dayanım gösterebilmektedir (de Souza Simões ve ark., 2017).

Emülsifikasyon işleminde oluşan kapsüllerin çapları küçük olup ek bir koruma sağlaması amacıyla ikinci çözelti içine daldırılmaktadır (Kailasapathy, 2009). Bu amaçla gam arabik, modifiye nişasta, pektin gibi karbonhidratlarla ve sodyum kazeinat, β-laktoglobulin, jelatin gibi proteinler hidrokolloid emülsifiyerler olarak kullanılmaktadır (Dickinson, 2009).



Şekil 6. Çok katmanlı emülsiyon oluşumu (Tokle ve ark., 2013).

Çok katlı emülsiyon oluşumunda önce suda çözünen emülsifiyerlerle kaplı olan yağ damlacıkları ile birinci emülsiyon oluşturulur. Sonra yüklü olan yağ damlalarının etrafında elektrostatik etkileşimlerle zıt yüklü

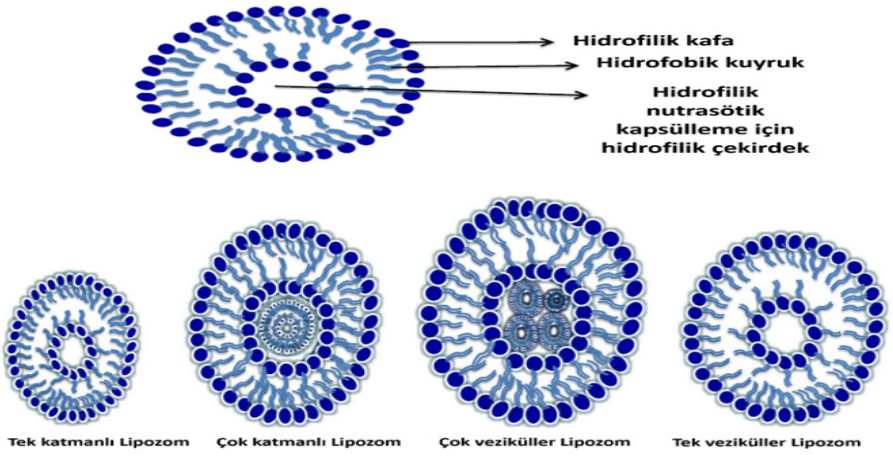
olan polimerlerle ikinci emülsiyon oluşturularak ikinci katman meydana getirilir. Bu sistemde polimer eklendikçe katman sayısı da arttırılır. Her bir emülsiyon için pozitif veya negatif yüklü biyopolimerlerin adsorpsiyonlarının tekrarlanmasıyla çok sayıda (n) emülsiyon oluşmaktadır. Şekil 6'da bu oluşum şematize edilmiştir (Tokle ve ark., 2013). Yukarıda belirtilen işlemler sonrasında püskürterek kurutma yöntemi ile emülsiyonlar toz formuna dönüştürülür (Bortnowska, 2015). Emülsifikasyon yönteminde emülsiyonu stabilize etmek için bitkisel yağ ve emülgatörler gibi ek hammaddeler gerektirdiğinden dolayı pahalıdır. Emülsifikasyon ayrıca, emülsiyon kararsızlığı, hücrelerin hayatta kalmasına zarar verebilecek kuvvetli karıştırma ihtiyacı, hücrelerin kapsüllere rastgele dahil edilmesi ve katı asepsi koşulları altında çalışmanız gerekiyorsa bitkisel yağı sterilize edememe gibi uygulamada zorluklara da neden olabilmektedir (Gbassi ve Vandamme, 2012).

Lipozom

Lipozom kapsülleme yöntemi son yıllarda başta gıda olmak üzere birçok alanda kullanılmaya başlamıştır. Hidrofilik biyoaktif maddeleri kaplamak ve korumak için lipozomlar kullanılmaktadır (Aditya ve ark., 2017). Lipozomlar, sulu bir çekirdeğe sahip bir veya daha fazla çift katmanlı zardan oluşan küresel parçacıklardır. Lipozom kapsülleme suda çözünen ve yağda çözünebilen bileşenlere dahil edilerek bozulmasını önlemek ve istenilen hedef bölgede salınması için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ghorbanzade ve ark., 2017). Lipozomlar, nispeten biyolojik olarak parçalanabilen, toksik olmayan, biyolojik olarak uyumlu ve düşük immünojenik fosfolipidler kullanılarak oluşturulmaktadır (Singh ve ark., 2012). Bu fosfolipitler, hidrofilik (polar) ve hidrofobik (polar olmayan) yapıda yağ asidi içermektedir (Aditya ve ark., 2017).

Lipozomların stabilitesini arttırmak için hidrojene yüksek miktarlarda lipid ve kolesterol ilave edilebildiği gibi lipozom yüzeyi kitosan ve florlu lipidler gibi polimerlerle kaplanması mümkündür (Mady ve Darwish 2010). Kolesterol gibi lipidlerin ilavesi ilaç dağıtımında oldukça faydalı olmakla birlikte, kolesterol alımının obezite ve kardiyovasküler hastalıklara neden olmasından dolayı gıda ürünlerinde tercih edilmemektedir. Kolesterole alternatif olarak, lipozomların üretimi için fosfolipidlerle birlikte fitosteroller kullanılmıştır. Fitosterollerin dahil edilmesiyle lipozomların kapsülleme etkinliğinin arttığı tespit edilmiştir (Chan ve ark., 2004).

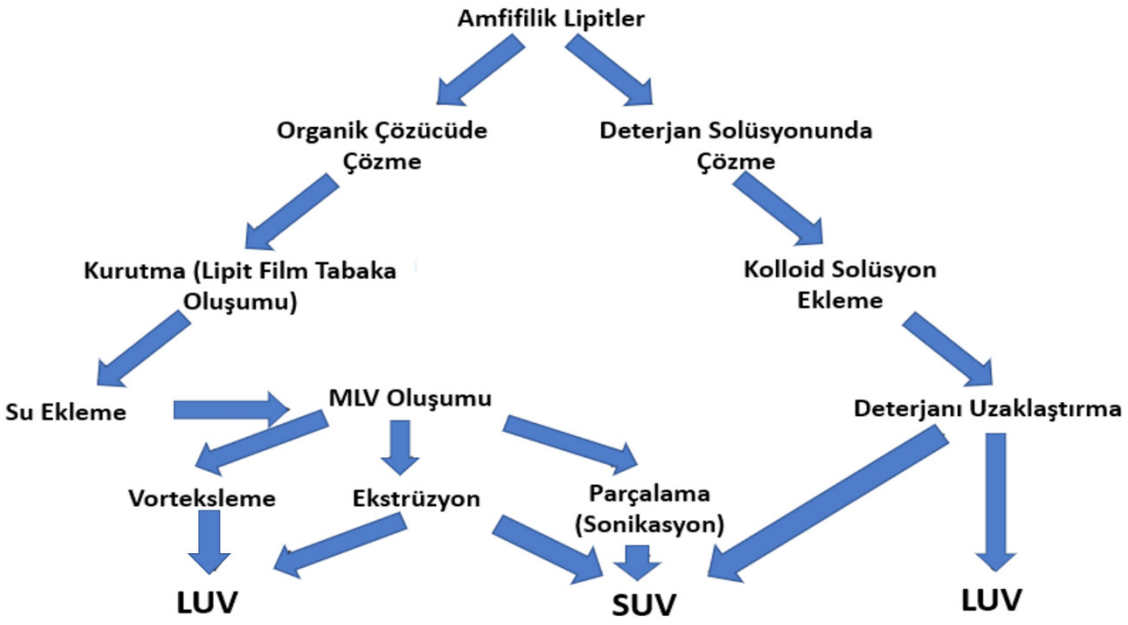
Lipozomlar, katman sayılarına ve büyüklüklerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Tek katmanlı lipozom içinde tek bir çift katman içeren lipozom vezikülleri bulunmaktadır. İki veya daha fazla çift katman içeriyor ise çok katmanlı lipozom vezikülleri meydana gelmektedir. Fiziksel özelliklerine bağlı olarak farklı lipozom türleri Şekil 7'de şematik olarak gösterilmiştir (Aditya ve ark., 2017). Küçük tek katmanlı lipozom vezikülleri 0,02- 0,1 µm arasında iken, büyük tek katmanlı lipozom vezikülleriler ise 10 µm'dir. Farklı hazırlama yöntemlerine bağlı olarak çok katmanlı (Multi Lamellar Vesicle=MLV) ve tek katmanlılar olarak meydana getirilirler. Tek katmanlı lipozomlar ise küçük tek katmanlı veziküller veya büyük tek katmanlı veziküller (Small Unilamellar Vesicle=SUV, Large Unilamellar Vesicle=LUV) lipozomlar diye ikiye ayrılır (Wang, 2005).



Şekil 7. Fiziksel özelliklerine bağlı olarak farklı lipozom türlerinin şematik gösterimi (Aditya ve ark., 2017).

Lipozomların hazırlamasında ilk basamak organik çözücülerde çözdürülen lipitlerin kurutulmasıdır. Daha sonra sulu ortamda lipozomların oluşturulması sağlanır. Lipozomu oluşturacak lipitlerin organik bir çözücü olan kloroform içinde çözdürüldükten sonra bu çözücünün azot gazı yardımıyla ile uçurulması sonucunda lipit film elde edilmektedir. Bu aşamalardan sonra elde edilen lipozomlar çeşitli analizlerle kontrol edilir (Kobayashi ve ark., 2005).

Lipozomların oluşturulmasında mekanik ve mekanik olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Mekanik yöntemler arasında ultrasonikasyon (parçalama), vorteksleme, yüksek basınç homojenizasyonu ve ekstrüzyon homojenizasyonu gibi yöntemler bulunmaktadır. Mekanik olmayan yöntemler olarak da ters faz buharlaşmasının yanında dondurarak kurutma ve tekrar sulandırma yöntemi kullanılır (Kırtıl ve Öztop, 2014). Kuru lipit hidrasyonu ile elde edilen MLV lipozomların katmanlarının sayısını ve büyüklüğü değiştirilerek SUV ve LUV'a döndürülebilmektedir. Lipozomların por çapına göre ayrılmasında genellikle lipozom ekstrüzyon cihazı kullanılırken MLV'lere yüksek enerji uygulanarak SUV'a dönüştürülmesinde sonikasyon cihazı kullanılır. Lipozom ekstrüzyon cihazında por çapından daha küçük olan lipozomlar pordan geçerek ayrışırlar (Wang, 2005). LUV ve SUV'un elde edilmesinde farklı yöntemler de tercih edilebilmektedir. Bunlardan birisi olan deterjan solüsyonunda çözme yönteminde çözme işlemi deterjan ile yapılmakta ve lipid-protein karışımından proteinler uzaklaştırılmaktadır. Deterjan solüsyonunda çözme yönteminde kullanılan kolloid çözeltiler genellikle tampon çözelti görevindedir. Deterjanın ortamdan uzaklaştırılması amacıyla santrifüj, jel filtrasyon ya da hızlandırılmış kontrollü diyaliz yöntemleri kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2005). Şekil 8'de lipozomların oluşturulmasında kullanılan yöntemler şematize edilmiştir (Lasch ve ark., 2003).



Şekil 8. Lipozom Hazırlama Yöntemleri (Lasch ve ark., 2003).

Hidrofilik biyoaktif maddelerin verilmesi için lipozomların en büyük avantajı, sulu iç fazın varlığıdır. Bu sulu iç faz yoksun katı lipid nanopartiküller ve emülsiyonlar gibi diğer lipid bazlı dağıtma sistemlerine kıyasla daha yüksek biyoaktif yükleme verimliliğine izin verir. Bununla birlikte hem hidrofilik hem de hidrofobik biyoaktif maddeler için dağıtım sistemini tasarlamadan önce dikkate alınması gereken birkaç husus vardır. Gerekli biyoaktif madde miktarını hapsetmek için gereken taşıyıcı malzeme miktarı ile sindirim sırasında bu yapının stabilitesinin korunup korunmadığı en önemli konulardır (Aditya ve ark., 2017). Taşıyıcı malzeme aşırı kullanıldığı taktirde gıda ürünlerinin tadı ve görünümünü değiştirebilmektedir (Saha ve Bhattacharya 2010). Aşırı miktarda taşıyıcı materyallerin kullanılması, uygun olmayan maliyet / fayda oranına neden olabilir.

Bu nedenle, taşıyıcı malzemelerin kullanımını en aza indirmek önemlidir (Aditya ve ark., 2015).

Lipozomlar hücre membranına yapısal olarak benzedikleri için diğer enkapsülasyon yöntemlerinden ayrılmaktadır. Bundan dolayı hücre içi yapılan çalışmalarda biyoaktif bileşenlerin hücrelere dağıtım ve salınımının kolay olduğu tespit edilmiştir (Laye ve ark., 2008). Biyoaktif maddelerin lipozomlar içinde kapsüllenmesi sadece sıkışmış biyoaktif maddelerin degradasyonunu önlemekle kalmaz aynı zamanda askorbik asit, antosiyaninler, kateşin gibi biyoaktifler lipozomların üretiminde kullanılan lipidlerin oksidasyonunu da engeller (Viljanen ve ark., 2004). Diğer avantajları ise kapsüllenmiş materyalin uygun zamana kadar saklanmasının kontrol edilmesi ve kapsüllenmiş biyoaktif ajanların midede sindirilmeden korunmasını sağlamaktır. Ayrıca kapsüllenmiş materyalin biyoyararlanımın sağlayacak şekilde gastrointestinal sistemde emilimi sağlanmaktadır (Fang ve Bhandari, 2010).

Lipozom yöntemi kullanıldığında büyük ölçekte üretim yapılamamakta, çok pahalı olmakta ve gıdaların işlenip muhafazasında düşük stabiliteye sahip olmaktadır (McClements, 2015). Lipozomlar, yardımcı bileşenler ile etkileşime girdikten sonra karmaşık gıda matriksi içinde bozunmaya eğilimli olup mide bağırsak sisteminin asidik koşullarında sınırlı stabiliteye sahiptir (Gibbs ve ark., 1999). Lipozomlar kullanıldığı gıdada fiziksel stabiliteyi kaybettiklerinde çökelti oluşturarak ürünün kalitesini de bozabilirler (Laye ve ark., 2008).

Akışkan Yatak Kaplama (Hava Süspansiyon Kaplama) Yöntemi

Akışkan yatak kaplama, genel olarak katı maddelerin kapsüllenmesi için sprey kaplama ve akışkan kurutma olarak da isimlendirilen bir yöntem olup gıda endüstrisinde enkapsülasyon aracı olarak kullanılan yaygın bir yöntemdir (Jyothi ve ark., 2009). Akışkan yatak kaplama 1950 yıllarında D.E. Wurster tarafından keşfedilmiştir. Alttan püskürtmeli akışkan yatak kaplama adı da verilen bu yönteme "Wruster işlemi" olarakta litaretüre girmiştir. Uzun zamandan beri bu yöntem ilaçların kaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin ilaçlarda kullanılmasının amacı tadın maskelenmesi ve stabilitesini arttırarak istenilen bölgede etki göstermesini sağlamaktır (Desai ve Park, 2005).

Bu yöntemde hava akımı sayesinde çekirdek materyalinin havada asılı kalması sağlanarak kaplama materyalinin bu çekirdek materyal üzerine püskürtülmesiyle katmanlı bir kapsülün oluşturulması sağlanmaktadır. Hava akımı en yüksek seviye çıktığında ise asılı olan bu materyaller dışarıya doğru itilerek oluşan hava kolonu sayesinde akışkan yatak kurutucuya ulaşır ve böylece kaplama materyalinin burada kuruyarak sertleşmesi sağlanır (Teunou ve Poncelet, 2005). Bu yöntem üç farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlar;

1. Üstten akışkan yatak kaplama yöntemi
2. Alttan akışkan yatak kaplama yöntemi
3. Açılı akışkan yatak kaplama yöntemleridir (Desai ve Park, 2005).

Genellikle bu yöntem beslenmede destek amaçlı kullanılan vitamin B ile C vitaminleri, demir sülfat, sodyum askorbat ve potasyum klorid gibi çeşitli karışımlarının enkapsüllenmesinde kullanılmaktadır. Gıda maddelerinin enkapsüllenmesinde bu yöntem özellikle renk ve aromanın geliştirilmesi için asitli gıdalarda kullanılmaktadır (Dezarn, 1995).

Akışkan kaplama yöntemi gıda teknolojisinde çok pahalı olmasından dolayı püskürtmeli kurutma yöntemi kadar tercih edilmemektedir. Son yıllarda ise akışkan yatak sistemlerinde maliyetin azaltılmasıyla ilgili çalışmalara ağırlık verilmektedir (Koç ve ark., 2010).

ENKAPSÜLASYON UYGULAMA ALANLARI

Et Ürünlerinde Enkapsülasyon Teknolojisinin Kullanımı

Gıdalarda uçucu yağların kaybını ve bozulmasını önlemek için işlenme ve depolama sırasında enkapsüle edilmesinin fazla olumlu etkileri olduğu görülmektedir (Hill ve ark., 2013). Fermente et ürünlerin besleyici değerinin artması için genellikle hayvansal yağlar, diğer yağlarla modifiye edilmektedir (Triki ve ark., 2013). Bunun için genellikle fermente et ürünlerine enkapsüle doymamış yağ asitleri katılmakta ve daha sağlıklı ürünler üretilebilmektedir (Pavlík ve ark., 2014).

Kümes hayvanlarında mikrobiyal et bozulmasına önlemek amacıyla tavuk filetolarına bulaştırılmış *Pseudomonas fluorescens'*a sodyum aljinat ile enkapsüle edilmiş ϕIBB-PF7A bakteriyofajı ile muamele edilmiştir. Sonuç olarak ilk iki günde 2 log sonraki 3 günde 1 log olmak üzere 5. günün sonunda toplamda 3 log

Pseudomonas fluorescens canlı hücre sayısını azalttığı görülmüştür (Alves ve ark., 2019).

Et ürünlerinde pişirme öncesi ekstrüzyon yöntemi uygulanarak enkapsüllenen soya fasulyesi yağı ile fosfatın ilave edilmesi, tüketime hazır et ürünlerinde oksidasyon stabilitesini arttırmaktadır. Bu uygulamaya ayrıca polifosfatların eklenmesiyle önemli bir kalite sorunu olan lipit oksidasyonunun tamamen engellendiği görülmüştür (Kılıç ve ark., 2018).

Fermente et ürünlerinin yapımında kullanılan starter kültür ve probiyotiklerin gelişiminde tuz yoğunluğu, et-yağ oranı, nitrit-nitrat varlığı ve baharatlar etkili olmaktadır. Starter kültür ve probiyotik bakterilerin bu etmenlere adapte olabilmeleri ve fermantasyon sonucundaki starter kültür sayısının düşüşünü engellemek amacıyla mikroenkapsülasyon teknolojisi ile kaplanmışlardır (Bilenler ve ark., 2017).

Tavuk eti üzerinde yapılan bir çalışmada kapsüllenmiş kekik yağının *Salmonella enteritidis*'e karşı antibakteriyel aktivitesini değerlendirmek amacıyla kekik yağı lipozom yöntemi kullanılarak kapsüllenmiştir. Sonuç olarak enkapsüle edilmiş kekik yağının edilmemiş olana göre Salmonella enteritidis'e karşı daha uzun süre inhibisyon etki gösterdiği görülmüştür (Cu ve ark., 2017).

Bromelain enzimi etin gevrekleştirilmesi amacıyla kullanılan enzimlerden biridir. Bu enzimin aktivesini korumak, artan sıcaklıklığın etkisiyle kontrollü salınımı sağlamak ve istenilen et karakteristiğini oluşturmak amacıyla lipozomun içerisinde enkapsüle edilmektedir. Lipozomun enkapsülasyonunda katmanlı vezikülleri oluşturabilmek amacıyla sonikasyon işlemine başvurulmuştur (Lee ve ark., 2000).

Yapılan bir çalışmada antioksidan etkisi güçlü ama kararsız olan askorbik asite %30 oranında yağda su emülsifikasyon yöntemi ile mısır yağı kullanılarak enkapsülasyon işlemi yapılmıştır. Enkapsüle edilmiş askorbik asit ile tavuk sosisi üretilmiş ve sonuç olarak üründe duyusal özelliklerin değişmediği görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda sosisin besin değerinin arttığı, su aktivitesinin korunduğu ve askorbik asidin kontrollü salınımı nedeniyle oksidasyon hızının yavaşladığı görülmüştür (Comunian ve ark., 2014).

Probiyotik Bakterilerde Enkapsülasyon Teknolojisinin Kullanımı

Probiyotik mikroorganizmalar insanların bağırsak mikrobiyal dengesini düzenleyen yararlı bakterilerdir. Ancak bu etkilerini yeterli miktarda alındıklarında gösterebilirler (Vuyst ve ark., 2008). En yoğun olarak kullanılan probiyotikler arasında *Lactobacillus acidophilus*, *L. casei, Bifidobacterium bifidum*, *B. longum*, *B. breve*, *B. infantice* ve *B. lactis* gelmektedir (Mortazavian ve ark., 2007). Probiyotik mikroorganizmaların gıdaların işlenmesi ve depolanması sırasında canlılığının korunmasında enkapsülasyon en etkili yöntemlerden biridir (De Prisco ve Mauriello, 2016). Günümüzde probiyotiklerin canlılığını koruyamadığı birçok gıda ürününde enkapsülasyon yöntemi uygulanmaktadır (Champagne ve ark., 2007). Fermantasyon sırasında bu bakterilerin gelişiminde tuz konsantrasyonu, katkı maddeleri ve baharat içeriği gibi etkenler probiyotikler üzerine olumsuz etkisi bulunmaktadır. Bu etkenlere karşı probiyotiklerin rahat birşekilde adapte olmaları, fermantasyon sonucu starter kültür sayısındaki kaybı en aza indirmek ve ürünün karakteristiğini oluşturmak için enkapsülasyon yöntemi tercih edilmektedir (Bilenler ve ark., 2017). Propiyotiklerin enkapsüllenmesi amacıyla en çok kullanılan yöntemler arasında ekstrüsyon ve emülsifikasyon yöntemleri yer almaktadır (Cook ve ark., 2012). Probiyotiklerin enkapsüllenmesinde genellikle aljinat, gumlar, kitosan ve nişasta gibi kaplama materyalleri kullanılmaktadır. Bu kaplama materyali tercihi kapsüllenecek mikroorganizmaya ve gıdaya göre değişmektedir (Haghshenas ve ark., 2015).

*Lactobacllus reuteri'*nin bebeklerin ve yeni doğanların çeşitli hastalıklarında kullanımı önemlidir. Yapılan bir çalışmada emülsiyon yöntemi kullanılarak fruktooligosakkarit ve aljnat'le enkapsüle edilmiş *Lactobacllus reuteri*'nin bebek mamasıdaki raf ömrü gözlemlenmiştir. Bu enkapsülasyon işlemiyle kaplama materyaline eklenen probiyotiklerin *Lactobacillus reuteri'*nin korunmasında etkili bir etken olduğu tespit edilmiştir (Kurt ve Turgay, 2022).

B. bifidum ve L. acidophilus bakterileri aljinat ve mısır nişastaları kullanılarak ekstrüzyon yöntemiyle enkapsüllenerek yoğurt içerisindeki yaşamsal faaliyetleri incelenmiştir. Gliserol ve aljinat karışımının -20 °C'de bile kapsüllenen probiyotik bakterilerin yaşam kabiliyetini arttırdığı saptanmıştır (Sultana ve ark., 2000).

Kaplama materyali olarak peyniraltı suyu proteini ile enkapsüllenen *B. breve* ile üretilen yoğutlarda probiyotikleri depolama süresince canlılığı takip edilmiştir.

Enkapsüle edilmiş olan *B. breve'*nin >2,6 log seviyesinde 28 gün boyunca canlı olduğu gözlemlenmiştir (Picot ve Lacroix, 2004).

Probiyotikler üzerine yapılan başka bir çalışmada ise *Bifidaobacterium BB-122* suşunun inülin ile enkapsüllenerek farklı süre ve sıcaklıklarda muhafazası durumunda canlı kalıp kalmadıkları incelenmiştir. Çalışma sonucunda enkapsüle edilen *Bifidaobacterium BB-122* suşunun 180 gün boyunca -20 ve +4 °C'de canlı kaldıkları saptanmıştır (Fritzen-Freire ve ark., 2012).

Farklı matriksler kullanılarak hazırlanan probiyotik bakteriler çeşitli et ürünlerinin üretim ve depolama aşamaları ile gastrointestinal sistemde canlı kalıp kalmadıklarının araştırılmıştır. Bu çalışmada enkapsüle edilmeyen probiyotik bakteriler ile enkapsüle edilen probiyotik bakterilerin karşılaştırılması yapıldığında %80 ile 95 arasında enkapsüle edilenlerin canlı kaldığı görülmüştür (Martín ve ark., 2015).

Laboratuvar şartlarında yapılan bir çalışmada *Bifidobacterium bifidum* pektin, aljinat ve peyniraltı suyu proteinleri kullanılarak emülsifikasyon yöntemiyle kaplanmıştır. Sonuç olarak kapsüllenmiş bakteriler pH 2,5'te 2 saat canlı kalabilirken kapsüllenmemiş olanlar ise ölmüşlerdir (Guérin ve ark., 2003).

Süt Ürünlerinde Enkapsülasyon Teknolojisinin Kullanımı

Süt ürünlerinde tat ve aroma gibi kalite kriterlerini koruyabilmek için enkapsülasyon yöntemleri süt teknolojisinde de kullanım alanı bulmuştur (Kınık ve ark., 2003).

Wang ve ark. (2018), polimerize peynir altı suyu proteini kullanarak enkapsüle edilmiş *L. acidophilus* LA-5 suşu ile yoğurt ürretimi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak yoğurtta fizikokimyasal özelliklerinin iyileştiği ve yoğurt suyunun ayrışmasınn azaldığı saptanmıştır.

Yapılan bir çalışmada *L. acidophilus ATCC 4356* suşu ekstrüzyon yöntemi kullanılarak aljinat ile kapsüllenmiştir. Enkapsüle edilmiş bu suş dondurmaya ilave edilerek -18 °C ve 3 ay depolanmıştır. Sonuç olarak son üründe suşların sayısının kob/g'ın altına düşmediği ve istenilen düzeyde canlılığının korunduğu gözlemlenmiştir (Sedefoğlu ve ark., 2022).

Peker ve Arslan (2011), ekstrüzyon veya emülsifikasyon yöntemleriyle enkapsüle ettikleri *B. bifidum BB-12* ve *L. acidophilus LA-5* suşlarını beyaz peynir yapımında kullanılarak muhafaza süresince canlılıkları yönünden incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada her iki enkapsülasyon yönteminin peynirlerde suşların canlı kaldıklarını belirtmişlerdir. Bu çalışma sonucunda her iki yöntemte probiyotik bakteri sayısını terapötik minimum seviyeden (>kob) daha yüksek tutmada etkili olmuştur.

Parmesan peyniri üzerine yapılan bir çalışmada kekik yağı ve peyniraltı suyu proteinlerinin enkapsüllenmesi sonucu hem kekik yağının antimikrobiyal etkisi sağlanmış hem de depolama sonrasında mantar ve mayanın gelişmediği görülmüştür (Fernandes ve ark., 2012).

Yapılan başka bir çalışmada enkapsüle rekombinant aminopeptidaz kullanılarak elde edilen Cheddar peynirinin proteolitik aktiviteyi olumlu etkilemesi ve son üründe de serbest aminoasit miktarını arttırmasından dolayı duyusal özelliklerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir (Azarnia ve ark., 2011).

Bakteriyosin benzeri olan antimikrobiyal peptid-P34 lipozom yöntemi kullanılarak saflaştırılmış lesitin (soya) ile kapsüllenmiş ve hem yağsız hemde tam yağlı sütte 7 °C ve 30 °C'de 21 gün boyunca depolanarak antilisterial etkisine bakılmıştır. Kapsüllenmiş halde bulunan bakteriyosin içeren sütlerde kapsüllenmemiş bakteriyosin içeren süt grubuna göre canlı *Listeria monocytogenes'*in daha az olduğu gözlemlenmiştir (da Silva Malheiros ve ark., 2012).

Kaplama materyali olarak nisin kullanılarak enkapsüle edilen *Bifidobacterium animalis ssp. Lactis* BB12 kefirde kullanılarak 28 gün boyunca buzdolabı koşullarında muhafaza edilmiştir. Yapay gastrik koşulların da kullanıldığı canlılık testleri sonucunda enkapsülleme işleminin bifidobakteri suşunun dayanıklılığını arttırdığı görülmüştür (González-Sanchez ve ark., 2010).

Yapılan başka bir çalışmada karrajenan ile enkapsüle edilen *Bifidobacterium longum* yoğurda eklenerek suşun canlılığı ve metabolik faaliyetleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak yapılan enkapsülasyon işleminin bakteriyi düşük pH seviyelerinde canlılığını koruduğu gözlemlenmiştir (Adhikari ve ark., 2003).

Soodbakhsh ve ark. (2012), inülin ile kapsüllenmiş *Lactobacillus casei* ve *Bifidobacterium lactis* suşları ile ilave ederek dondurulmuş yoğurt üretek -18 °C de 150 gün depolamışlardır. Depolama süresi boyunca kapsüllemenin probiyotik bakteri sayısında

kapsüllenmeyen suşlar ile üretilen yoğurtlar arasında yaklaşık 1 log avantaj olduğu tespit edilmiştir.

Kalsiyum-aljinat kullanılarak enkapsüllenen *Lactobacillus casei* (Lc-01) ve *Bifidobacterium lactis* (Bb-12) suşları ile üretilen dondurmalarda muhafaza süresince suşların canlılıkları araştırılmıştır. Üretim sonrasında dondurmalar -20 °C'de 180 gün boyunca depolanmıştır. Bu araştırmada kapüllenmemiş probiyotik bakterilerin kullanıldığı dondurmalardaki bakterilerde %30 daha az sayıda bakteri olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada suşların 1. gün sayımında kapsüllenmemiş suş kullanılan dondurmalarda 5,1 × kob/ml iken kapsüllenmiş suş kullanılarak elde edilen dondurmada ise 4,1 × kob/ml olduğu görülmüştür. Dondurmaların 180. gün analizlerinde enkapsülasyon işlemi uygulanmayan örneklerde 4,2 × kob/ml, enkapsülasyon işlemi uygulanan örneklerde ise 1,1 × kob/ml probiyotik bakteri olduğu saptanmıştır (Homayouni ve ark., 2008).

Peynir işletmelerinde bakteriyofaj ile kontaminasyon en önemli sorunlardan biridir. Starter kültür bakterilerinin kalsiyum aljinat ile kapsüllenerek yapılan bir çalışmada enkapsülasyon sonucunda bakterileri bakteriyofaja karşı korunduğu tespit edilmiştir (Steenson ve ark., 1987).

Gıda Bileşenlerinde Enkapsülasyon Teknolojisinin Kullanımı

Süt ve et teknolojisinde kullanımının yanı sıra enkapsülasyon teknolojisi gıda bileşenlerinin ortam koşulu ile biyokimyasal etkileşimlerinin sonucu bozulmalarına karşı koruyucu etki olarak gıda sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Lipozom yöntemi kullanılarak kitosanla kapsüllenen rosmarinik asidin antioksidan etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, kapsüllenen rosmarinik asidin antioksidan etkisinin daha uzun süreli olduğu ve lipid oksidasyonunu önemli derecede azalttığı tespit edilmiştir (Panya ve ark., 2010).

Karanfil esansiyel yağının çeşitli patojenik bakterilere (*Escherichia coli, Salmonella Typhimurium, Staphylococcus aureus, Listeria monocytogenes*) karşı antimikrobiyal etkisinin olduğu bilinmektedir. Yapılan bir çalışmada sodyum aljinat ile enkapsüllenmiş karanfil yağının enkapsüle edilmemiş karanfil yağına kıyasla patojen mikroorganizmaların inhibisyonunda daha etkili olduğu görülmüştür (Radünz ve ark., 2019).

Üzüm çekirdeği özütünden elde edilen fenolik bileşiklerin lipozom yöntemiyle kapsüllenmesi sonucunda gıda ortamında antioksidan özelliklerini kaybetme riskinin ortadan kalktığı görülmüştür (Gibis ve ark., 2012).

Zerdeçaldan elde edilen kurkumin'in enkapsülasyonlandığı bir çalışmada gıdanın işlenmesi sırasında baharatın yüksek sıcaklığa karşı bozulmadan korunduğu tespit edilmiştir (Niu ve ark., 2012).

Balık yağlarının oksidasyona karşı direncini arttırmak üzere maltodekstrin ile kaplanmasıyla balık yağlarının bozulmaları üzerine yapılan araştırmada enkapsülasyonun lipid oksidayonunu önemli derecede azalttığı saptanmıştır (Baik ve ark., 2004).

Limon otunda bulunan uçucu yağların antimikrobiyal etkisini arttırmak için yapılan enkapsülasyon işleminin *Escherichia coli* inhibisyonu hızlandırdığı görülmüştür (Salvia-Trujillo ve ark., 2015). Benzer bir çalışmada ise karvakrol ve limonen bileşenleri ayçiçek yağı ile enkapsüle edilmiş ve sonuçta bunların 3 farklı mikroorganizmaya (*Escherichia coli, Lactobacillus delbrrueckii* ve *Saccharomyces cerevisiae*) karşı antimikrobiyal etki gösterdikleri görülmüştür (Donsì ve ark., 2012).

B1 vitaminin (tiamin) gıda işleme prosesleri sırasında bozulmasının engellenmesi amacıyla lesitin ile emülsifikasyon yöntemi kullanılarak kapsüllenmiştir. Sonuç olarak enkapsüllenmiş B1vitaminin pH'a bağlı bozulmalara karşı korunduğu tespit edilmiştir (Şümnü ve Şahin, 2015).

Portakal yağının aromasının korunması üzerine yapılan bir çalışmada, portakal yağının laktoz/kazeinat ile kaplanması sonucunda portakal yağının aromasının daha uzun süre korunduğu saptanmıştır (Edris ve Bergnståhl, 2001).

SONUÇ

Önemli gıda bileşenleri ve katkı maddelerinin gıda işleme prosesi, depolama ve muhafaza koşulları esnasında bozulmalarını önleyebilmek için çeşitli yöntemlerle enkapsülasyon işlemi uygulanmaktadır. Fonksiyonel bileşenlerin spesifik fizikokimyasal ve moleküler gereksinimlerinin karşılanması amacıyla farklı yöntemler kullanılarak enkapsülasyon yapılmaktadır. Kapsülleme, birçok avantajı ile fonksiyonel bileşen üzerinde koruyucu bir kabuk bariyeri sağlayarak etkili bir koruma yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Fonksiyonel bileşenlerin kapsüllenmesi ile korunan aktif madde gıdada

stabilizasyon ve kontrollü salınım özellikleri sağlar. Enkapsülasyon, gıda ürünlerinin sağlıklı beslenmede etkin faydalar sağlarken istenen işlevsellik ile güçlendirerek gıda endüstrisindeki bazı sıkıntılara çözüm getirmektedir. Bu sayede mikro besin eksikliklerini çözebilir, yenilikçi fonksiyonel gıdalar yapılabilir ve en önemlisi gıdaların raf ömrü uzatılabilir. Bozulmaların önlenmesiyle enkapsülasyon ekonomik kayıpların azalmasına neden olabilir. Ayrıca sağlık sorunlarına neden olan gıda patojenlerine karşı koruma sağlanmasında ortaya çıkan bir yöntem olarakta sayılmaktadır. Bu yararlarının dışında enkapsülasyon yöntemi hakkında yeterli araştırmaların sayısının az olması ve diğer yöntemlere göre pahalı olması tercih edilmesini zorlaştırmaktadır.

Enkapsülasyon tekniğinin gıda endüstrisinde her geçen gün daha önemli hale geldiği ifade edilebilir. Kapsülleme yöntemleriyle ilişkili birçok çalışmanın yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle gıda alanında laboratuvar aşamasında yapılan çalışmaların gıda sektörü alanında pratik olarak uygulanması sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

Adhikari, K., Mustapha, A. & Grün, I. U. (2003). Survival and metabolic activity of microencapsulated Bifidobacterium longum in stirred yogurt. Journal of Food Science, 68 (1), 275-280.

Aditya, N. P., Espinosa, Y. G. & Norton, I. T. (2017). Encapsulation systems for the delivery of hydrophilic nutraceuticals: Food Application. Biotechnology advances, 35 (4), 450-457.

Aditya, N. P., Yang, H., Kim, S. & Ko, S. (2015). Fabrication of amorphous curcumin nanosuspensions using β-lactoglobulin to enhance solubility, stability, and bioavailability. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 127, 114-121.

Alves, D., Marques, A., Milho, C., Costa, M. J., Pastrana, L. M., Cerqueira, M. A. & Sillankorva, S. M. (2019). Bacteriophage ϕIBB-PF7A loaded on sodium alginate-based films to prevent microbial meat spoilage. International Journal of Food Microbiology, 291, 121-127.

Alvim, I. D., Stein, M. A., Koury, I. P., Dantas, F. B. H. & Cruz, C. L. D. C. V. (2016). Comparison between the spray drying and spray chilling microparticles contain ascorbic acid in a baked product application. LWT-Food Science and Technology, 65, 689-694.

Anal, A. K. & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. Trends in Food Science & Technology, 18 (5), 240-251.

Arshady, R. (1993). Microcapsules for food. Journal of Microencapsulation, 10 (4), 413-435.

Augustin, M. A., Sanguansri, L., Margetts, C. & Young, B. J. F. A. (2001). Microencapsulating food ingredients. Food Australia, 53 (6), 220-223.

Azarnia, S., Lee, B., St-Gelais, D., Kilcawley, K. & Noroozi, E. (2011). Effect of free and encapsulated recombinant aminopeptidase on proteolytic indices and sensory characteristics of Cheddar cheese. LWT-Food Science and Technology, 44 (2), 570-575.

Baik, M. Y., Suhendro, E. L., Nawar, W. W., McClements, D. J., Decker, E. A. & Chinachoti, P. (2004). Effects of antioxidants and humidity on the oxidative stability of microencapsulated fish oil. Journal of the American Oil Chemists' Society, 81 (4), 355-360.

Bansode, S. S., Banarjee, S. K., Gaikwad, D. D., Jadhav, S. L. & Thorat, R. M. (2010). Microencapsulation: a review. International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research, 1 (2), 38-43.

Barbosa, M. S., Todorov, S. D., Jurkiewicz, C. H. & Franco, B. D. (2015). Bacteriocin production by Lactobacillus curvatus MBSa2 entrapped in calcium alginate during ripening of salami for control of Listeria monocytogenes. Food Control, 47, 147-153.

Bilenler, T., Karabulut, I. & Candogan, K. (2017). Effects of encapsulated starter cultures on microbial and physicochemical properties of traditionally produced and heat treated sausages (sucuks). LWT, 75, 425-433.

Boral, S. & Bohidar, H. B. (2010). Effect of ionic strength on surface-selective patch binding-induced phase separation and coacervation in similarly charged gelatin−Agar molecular systems. The Journal of Physical Chemistry B, 114 (37), 12027-12035.

Bortnowska, G. (2015). Multilayer oil-in-water emulsions: formation, characteristics and application as the carriers for lipophilic bioactive food components-a review. Polish Journal of Food

and Nutrition Sciences, 65 (3).

Burgain, J., Gaiani, C., Linder, M. & Scher, J. (2011). Encapsulation of probiotic living cells: From laboratory scale to industrial applications. Journal of Food Engineering, 104 (4), 467-483.

Champagne, C. P. & Fustier, P. (2007). Microencapsulation for the improved delivery of bioactive compounds into foods. Current Opinion in Biotechnology, 18 (2), 184-190.

Chan, Y. H., Chen, B. H., Chiu, C. P. & Lu, Y. F. (2004). The influence of phytosterols on the encapsulation efficiency of cholesterol liposomes. International Journal of Food Science & Technology, 39 (9), 985-995.

Charve, J. & Reineccius, G. A. (2009). Encapsulation performance of proteins and traditional materials for spray dried flavors. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57 (6), 2486-2492.

Chen, L., Remondetto, G. E. & Subirade, M. (2006). Food protein-based materials as nutraceutical delivery systems. Trends in Food Science & Technology, 17 (5), 272-283.

Chew, S. C., Tan, C. H., Pui, L. P., Chong, P. N., Gunasekaran, B. & Nyam, K. (2019). Encapsulation technologies: A tool for functional foods development. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8 (5), 154-162.

Chong, G. H., Yunus, R., Abdullah, N., Choong, T. S. Y. & Spotar, S. (2009). Coating and encapsulation of nanoparticles using supercritical antisolvent. American Journal of Applied Sciences, 6 (7), 1352-1358.

Comunian, A., Thomazini, M., Gambagorte, V. F., Trindade, M. A. & Favaro-Trindade, C. S. (2014). Effect of incorporating free or encapsulated ascorbic acid in chicken frankfurters on physicochemical and sensory stability. J Food Sci Eng, 167-175.

Cook, M. T., Tzortzis, G., Charalampopoulos, D. & Khutoryanskiy, V. V. (2012). Microencapsulation of probiotics for gastrointestinal delivery. Journal of Controlled Release, 162 (1), 56-67.

Cui, H., Yuan, L., Ma, C., Li, C. & Lin, L. (2017). Effect of nianoliposome-encapsulated thyme oil on growth of Salmonella enteritidis in chicken. Journal of Food Processing and Preservation, 41 (6), e13299.

da Silva Malheiros, P., Sant'Anna, V., Utpott, M. & Brandelli, A. (2012). Antilisterial activity and stability of nanovesicle-encapsulated antimicrobial peptide P34 in milk. Food Control, 23 (1), 42-47.

De Kruif, C. G., Weinbreck, F. & de Vries, R. (2004). Complex coacervation of proteins and anionic polysaccharides. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 9 (5), 340-349.

De Prisco, A. & Mauriello, G. (2016). Probiotication of foods: A focus on microencapsulation tool. Trends in Food Science & Technology, 48, 27-39.

de Souza Simões, L., Madalena, D. A., Pinheiro, A. C., Teixeira, J. A., Vicente, A. A. & Ramos, O. L. (2017). Micro-and nano bio-based delivery systems for food applications: In vitro behavior. Advances in Colloid and Interface Science, 243, 23-45.

de Vos, P., Faas, M. M., Spasojevic, M. & Sikkema, J. (2010). Encapsulation for preservation of functionality and targeted delivery of bioactive food components. International Dairy Journal, 20 (4), 292-302.

De Vuyst, L., Falony, G. & Leroy, F. (2008). Probiotics in fermented sausages. Meat Science, 80 (1), 75-78.

Desai, K. G. H. & Jin Park, H. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. Drying Technology, 23 (7), 1361-1394.

DeZarn T. G. (1995). Food ingredients encapsulation: An overview. In S. J. Risch & G. A. Reineccius (Eds.): Encapsulation and controlled release of food ingredients. ACS symposium series. Cilt 590, Sf. 74–86.

Dias, D. R., Botrel, D. A., Fernandes, R. V. D. B. & Borges, S. V. (2017). Encapsulation as a tool for bioprocessing of functional foods. Current Opinion in Food Science, 13, 31-37.

Dickinson, E. (2009). Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. Food Hydrocolloids, 23 (6), 1473-1482.

Donsì, F., Annunziata, M., Vincensi, M. & Ferrari, G. (2012). Design of nanoemulsion-based delivery systems of natural antimicrobials: effect of the emulsifier. Journal of Biotechnology, 159 (4),

342-350.

Dube, A., Ng, K., Nicolazzo, J. A. & Larson, I. (2010). Effective use of reducing agents and nanoparticle encapsulation in stabilizing catechins in alkaline solution. Food Chemistry, 122 (3), 662-667.

Dubey, R. (2009). Microencapsulation technology and applications. Defence Science Journal, 59 (1), 82.

Edris, A. & Bergnståhl, B. (2001). Encapsulation of orange oil in a spray dried double emulsion. Food/Nahrung, 45 (2), 133-137.

Ezhilarasi, P. N., Karthik, P., Chhanwal, N. & Anandharamakrishnan, C. (2013). Nanoencapsulation techniques for food bioactive components: a review. Food and Bioprocess Technology, 6 (3), 628-647.

Fang, Z. & Bhandari, B. (2010). Encapsulation of polyphenols–a review. Trends in Food Science & Technology, 21 (10), 510-523.

Favaro-Trindade, C. S., Heinemann, R. J. B. & Pedroso, D. D. L. (2011). Developments in probiotic encapsulation. CAB Rev, 6, 1-8.

Fernandes, Â., Antonio, A. L., Oliveira, M. B. P., Martins, A. & Ferreira, I. C. (2012). Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms: A review. Food chemistry, 135 (2), 641-650.

Fritzen-Freire, C. B., Prudêncio, E. S., Amboni, R. D., Pinto, S. S., Negrão-Murakami, A. N. & Murakami, F. S. (2012). Microencapsulation of bifidobacteria by spray drying in the presence of prebiotics. Food Research International, 45 (1), 306-312.

Garti, N. & McClements, D. J. (2012). Encapsulation technologies and delivery systems for food ingredients and nutraceuticals, 2nd ed. Elsevier.

Gbassi, G. K. & Vandamme, T. (2012). Probiotic encapsulation technology: from microencapsulation to release into the gut. Pharmaceutics, 4 (1), 149-163.

Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A. & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. Food Research International, 40 (9), 1107-1121.

Ghorbanzade, T., Jafari, S. M., Akhavan, S. & Hadavi, R. (2017). Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt. Food Chemistry, 216, 146-152.

Gibbs, B. F, Kermasha, S., Alli, I., Catherine, N. & Mulligan, B. (1999). Encapsulation in the food industry: a review. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 50 (3), 213-224.

Gibis, M., Vogt, E. & Weiss, J. (2012). Encapsulation of polyphenolic grape seed extract in polymer-coated liposomes. Food & Function, 3 (3), 246-254.

González-Sánchez, F., Azaola, A., Gutıérrez-López, G. F. & Hernández-Sánchez, H. (2010). Viability of microencapsulated Bifidobacterium animalis ssp. lactis BB12 in kefir during refrigerated storage. International Journal of Dairy Technology, 63 (3), 431-436.

Gouin, S. (2004). Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. Trends in Food Science & Technology, 15 (7-8), 330-347.

Gökmen, S., Palamutoğlu, R. & Sarıçoban, C. (2012). Gıda endüstrisinde enkapsülasyon uygulamaları. Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7 (1), 36-50.

Guérin, D., Vuillemard, J. C. & Subirade, M. (2003). Protection of bifidobacteria encapsulated in polysaccharide-protein gel beads against gastric juice and bile. Journal of Food Protection, 66 (11), 2076-2084.

Haghshenas, B., Nami, Y., Haghshenas, M., Barzegari, A., Sharifi, S., Radiah, D. & Abdullah, N. (2015). Effect of addition of inulin and fenugreek on the survival of microencapsulated Enterococcus durans 39C in alginate-psyllium polymeric blends in simulated digestive system and yogurt. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 10 (4), 350-361.

Hill, L. E., Gomes, C. & Taylor, T. M. (2013). Characterization of beta-cyclodextrin inclusion complexes containing essential oils (trans-cinnamaldehyde, eugenol, cinnamon bark, and clove bud extracts) for antimicrobial delivery applications. LWT-Food Science and Technology, 51 (1), 86-93.

Homayouni, A., Azizi, A., Ehsani, M. R., Yarmand, M. S. & Razavi, S. H. (2008). Effect of microencapsulation and resistant starch on the probiotic survival and sensory properties of synbiotic ice cream. Food Chemistry, 111 (1), 50-55.

Huang, H. J., Yuan, W. K. & Chen, X. D. (2006). Microencapsulation based on emulsification for producing pharmaceutical products: A literature review. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing, 14 (3-4), 515-544.

Hughes, G. A. (2005). Nanostructure-mediated drug delivery. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, 1 (1), 22-30.

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.

Kailasapathy, K. (2002). Microencapsulation of probiotic bacteria: technology and potential applications. Current Issues in Intestinal Microbiology, 3 (2), 39-48.

Kailasapathy, K. (2009). Encapsulation technologies for functional foods and nutraceutical product development. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources, 4 (033), 1-19.

Katona, J. M., Sovilj, V. J., Petrović, L. B. & Milanović, J. L. (2010). Preparation and characterization of oil containing microcapsules obtained by an interaction induced coacervation. Journal of Dispersion Science and Technology, 31 (12), 1679-1684.

Kılıç, B., Şimşek, A., Claus, J. R, Karaca, E. & Bilecen, D. (2018). Inhibition of Lipid Oxidation by Using a Combina-tion of Encapsulated and Unencapsulated Polyphosphates in Cooked Ground Meat during Storage. Meat and Muscle Biology, 1, 21-21.

Kınık, Ö., Kavas, G. & Yılmaz, E. (2003). Mikroenkapsülasyon tekniği ve süt teknolojisindeki kullanım olanakları. Gıda, 28 (4).

Kırtıl, E. & Öztop, M. H. (2014). Enkapsülasyon maddesi olarak lipozom ve gıdalarda kullanımı: Yapısı, karakterizasyonu, üretimi ve stabilitesi. Akademik Gıda, 12 (4), 41-57.

King, A. H. (1995). Encapsulation of Food Ingredients; A Review of Available Technology, Focusing on Hydrocolloids. In: Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients, Eds; Risch, S.J., Reineccius, G.A., American Chemical Society.

Kobayashi, N., Nishikawa, M. & Takakura, Y. (2005). Gene therapy and gene delivery. Drug Delivery: Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc, 305-319.

Koç, M., Sakin, M. & Kaymak Ertekin, F. (2010). Microencapsulation and its Applications in Food Technology. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 16 (1), 77-86.

Krasaekoopt, W., Bhandari, B. & Deeth, H. (2003). Evaluation of encapsulation techniques of probiotics for yoghurt. International Dairy Journal, 13 (1), 3-13.

Krasaekoopt, W. & Watcharapoka, S. (2014). Effect of addition of inulin and galactooligosaccharide on the survival of microencapsulated probiotics in alginate beads coated with chitosan in simulated digestive system, yogurt and fruit juice. LWT-Food Science and Technology, 57 (2), 761-766.

Kurt, K. K. & Turgay, Ö. Fruktooligosakkarit ve aljinat ile enkapsüle edilmiş Lactobacillus reuteri DSM 17938 suşunun kurumaya karşı direncinin saptanması. Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi, 27, 20-25.

Lagrega, M. D., Buchingam, P. L. & Evans, J. C. (1994). And The Environmental Resources Group, Hazardous Waste Management, Mc Graw Hill Inc. pp. 1103.

Lasch, J., Weissig, V. & Brandl, M. (2003). Preparation of liposomes, 2nd Ed., Oxford University Press, pp. 3-29.

Laye, C., McClements, D. J. & Weiss, J. (2008). Formation of biopolymer-coated liposomes by electrostatic deposition of chitosan. Journal of Food Science, 73 (5), N7-N15.

Lee, D. H., Jin, B. H., Hwang, Y. I. & Lee, S. C. (2000). Encapsulation of bromelain in liposome. Preventive Nutrition and Food Science, 5 (2), 81-85.

Leong, W. F., Lai, O. M., Long, K., Man, Y. B. C.,

Misran, M. & Tan, C. P. (2011). Preparation and characterisation of water-soluble phytosterol nanodispersions. Food Chemistry, 129 (1), 77-83.

Lopez-Rubio, A., Gavara, R. & Lagaron, J. M. (2006). Bioactive packaging: turning foods into healthier foods through biomaterials. Trends in Food Science & Technology, 17 (10), 567-575.

Madene, A., Jacquot, M., Scher, J. & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release–a review. International Journal of Food Science & Technology, 41 (1), 1-21.

Mady, M. M. & Darwish, M. M. (2010). Effect of chitosan coating on the characteristics of DPPC liposomes. Journal of Advanced Research, 1 (3), 187-191.

Martín, M. J., Lara-Villoslada, F., Ruiz, M. A. & Morales, M. E. (2015). Microencapsulation of bacteria: A review of different technologies and their impact on the probiotic effects. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 27, 15-25.

McClements, D. J. (2015). Encapsulation, protection, and release of hydrophilic active components: Potential and limitations of colloidal delivery systems. Advances in Colloid and Interface Science, 219, 27-53.

Meena, K. S., Bairwa, N. K. & Parashar, B. (2011). Formulation and in vitro evaluation of verapamil hydrochloride loaded microcapsule using different polymer. Asian Journal of Biochemical and Pharmaceutical Research, 1 (3), 528-538.

Mohammed, N. K., Tan, C. P., Manap, Y. A., Muhialdin, B. J. & Hussin, A. S. M. (2020). Spray drying for the encapsulation of oils—A review. Molecules, 25 (17), 3873.

Mortazavianş A., Razaviş S. H., Ehsani, M. R. & Sohrabvandi, S. (2007). Principles and methods of microencapsulation of probiotic microorganisms. Iraian Journal of Biotechnology, 5 (1), 1-18.

Mozafari, M. R., Flanagan, J., Matia-Merino, L., Awati, A., Omri, A., Suntres, Z. E. & Singh, H. (2006). Recent trends in the lipid-based nanoencapsulation of antioxidants and their role in foods. Journal of the Science of Food and Agriculture, 86 (13), 2038-2045.

Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S. & Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. Procedia Food Science, 1, 1806-1815.

Niu, Y., Ke, D., Yang, Q., Wang, X., Chen, Z., An, X. & Shen, W. (2012). Temperature-dependent stability and DPPH scavenging activity of liposomal curcumin at pH 7.0. Food Chemistry, 135 (3), 1377-1382.

Oliveira, A. C., Moretti, T. S., Boschini, C., Baliero, J. C. C., Freitas, O. D. & Favaro-Trindade, C. S. (2007). Stability of microencapsulated B. lactis (BI 01) and L. acidophilus (LAC 4) by complex coacervation followed by spray drying. Journal of Microencapsulation, 24 (7), 685-693.

Orive, G., Anitua, E., Pedraz, J. L. & Emerich, D. F. (2009). Biomaterials for promoting brain protection, repair and regeneration. Nature Reviews Neuroscience, 10 (9), 682-692.

Panya, A., Laguerre, M., Lecomte, J., Villeneuve, P., Weiss, J., McClements, D. J. & Decker, E. A. (2010). Effects of chitosan and rosmarinate esters on the physical and oxidative stability of liposomes. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58 (9), 5679-5684.

Paucar, O. C., Tulini, F. L., Thomazini, M., Balieiro, J. C. C., Pallone, E. M. J. A. & Favaro-Trindade, C. S. (2016). Production by spray chilling and characterization of solid lipid microparticles loaded with vitamin D3. Food and Bioproducts Processing, 100, 344-350.

Pavlík, Z., Saláková, A., Kameník, J., Pospíšil, J., Králová, M. & Steinhauserová, I. (2014). Effect of micro-encapsulated n-3 fatty acids on quality properties of two types of dry sausages. Acta Veterinaria Brno, 83 (2).

Peker, H. & Arslan, S. (2011). Mikroenkapsülasyon ve süt teknolojisinde kullanım alanları. Akademik Gıda, 9 (6), 70-80.

Pérez-Chabela, M. L., Lara-Labastida, R., Rodriguez-Huezo, E. & Totosaus, A. (2013). Effect of spray drying encapsulation of thermotolerant lactic acid bacteria on meat batters properties. Food and Bioprocess Technology, 6 (6), 1505-1515.

Picot, A. & Lacroix, C. (2004). Encapsulation of bifidobacteria in whey protein-based microcapsules and survival in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt.

International Dairy Journal, 14 (6), 505-515.

Prata, A. S., Zanin, M. H., Ré, M. I. & Grosso, C. R. (2008). Release properties of chemical and enzymatic crosslinked gelatin-gum Arabic microparticles containing a fluorescent probe plus vetiver essential oil. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 67 (2), 171-178.

Qi, M., Gu, Y., Sakata, N., Kim, D., Shirouzu, Y., Yamamoto, C., Hiura, A., Sumi, S. & Inoue, K. (2004). PVA hydrogel sheet macroencapsulation for the bioartificial pancreas. Biomaterials, 25 (27), 5885-5892.

Qi, W. T., Ma, J., Yu, W. T., Xie, Y. B., Wang, W. & Ma, X. (2006). Behavior of microbial growth and metabolism in alginate–chitosan–alginate (ACA) microcapsules. Enzyme and Microbial Technology, 38 (5), 697-704.

Radünz, M., da Trindade, M. L. M., Camargo, T. M., Radünz, A. L., Borges, C. D., Gandra, E. A. & Helbig, E. (2019). Antimicrobial and antioxidant activity of unencapsulated and encapsulated clove (Syzygium aromaticum, L.) essential oil. Food Chemistry, 276, 180-186.

Rao, J. P. & Geckeler, K. E. (2011). Polymer nanoparticles: preparation techniques and size-control parameters. Progress in Polymer Science, 36 (7), 887-913.

Reis, C. P., Neufeld, R. J., Ribeiro, A. J. & Veiga, F. (2006). Nanoencapsulation I. Methods for preparation of drug-loaded polymeric nanoparticles. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, 2 (1), 8-21.

Rodrigues, F. J., Cedran, M. F. & Garcia, S. (2018). Influence of linseed mucilage incorporated into an alginate-base edible coating containing probiotic bacteria on shelf-life of fresh-cut yacon (Smallanthus sonchifolius). Food and Bioprocess Technology, 11 (8), 1605-1614.

Rokka, S. & Rantamäki, P. (2010). Protecting probiotic bacteria by microencapsulation: challenges for industrial applications. European Food Research and Technology, 231 (1), 1-12.

Sagalowicz, L. & Leser, M. E. (2010). Delivery systems for liquid food products. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 15 (1-2), 61-72.

Sagis, L. M. (2015). Microencapsulation and microspheres for food applications. In: Sagis LM (Ed): Determination of Mechanical Properties of Microcapsules. England, London: Academic Press, pp.195-205.

Saha, D. & Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: a critical review. Journal of Food Science and Technology, 47 (6), 587-597.

Salvia-Trujillo, L., Rojas-Graü, M. A., Soliva-Fortuny, R. & Martín-Belloso, O. (2015). Use of antimicrobial nanoemulsions as edible coatings: Impact on safety and quality attributes of fresh-cut Fuji apples. Postharvest Biology and Technology, 105, 8-16.

Sedefoğlu, S., Ortakcı, F. & Sert, S. (2022). Enkapsüle Edilmiş ve Serbest Formda Probiyotik Lactobacillus acidophilus ATCC 4356 Suşunun Dondurma Depolama Periyodunda Stabilitesinin İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 53 (1), 14-23.

Semyonov, D., Ramon, O., Kaplun, Z., Levin-Brener, L., Gurevich, N. & Shimoni, E. (2010). Microencapsulation of Lactobacillus paracasei by spray freeze drying. Food Research International, 43 (1), 193-202.

Shahidi, F. & Han, X. Q. (1993). Encapsulation of food ingredients. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 33 (6), 501-547.

Singh, H., Thompson, A., Liu, W. & Corredig, M. (2012). Liposomes as food ingredients and nutraceutical delivery systems. In: Garti N., McClements DJ (Eds). Encapsulation technologies and delivery systems for food ingredients and nutraceuticals. Woodhead Publishing pp. 287-318.

Soodbakhsh, S., Gheisari, H. R., Aminlari, M. & Dehnavi, T. (2012). Viability of encapsulated Lactobacillus casei and Bifidobacterium lactis in synbiotic frozen yogurt and their survival under in vitro simulated gastrointestinal conditions. International Journal of Probiotics & Prebiotics, 7 (3/4), 121.

Soukoulis, C. & Bohn, T. (2018). A comprehensive overview on the micro-and nano-technological encapsulation advances for enhancing the chemical stability and bioavailability of carotenoids. Critical Reviews in Food Science

and Nutrition, 58 (1), 1-36.

Steenson, L. R., Klaenhammer, T. R. & Swaisgood, H. E. (1987). Calcium alginate-immobilized cultures of lactic streptococci are protected from bacteriophages. Journal of Dairy Science, 70 (6), 1121-1127.

Sultana, K., Godward, G., Reynolds, N., Arumugaswamy, R., Peiris, P. & Kailasapathy, K. (2000). Encapsulation of probiotic bacteria with alginate–starch and evaluation of survival in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt. International Journal of Food Microbiology, 62 (1-2), 47-55.

Şümnü, S. G. & Şahin, S. (2015). B1 vitaminin ikili emülsiyon yöntemi ile kapsüllenmesi. ODTÜMETU, 44.

Teunou, E. & Poncelet, D. (2005). Food powder processing: Fluid-bed coating. In: Encapsulated and Powdered Foods. Onwulata CI (Ed). CRC Press, Taylor & Francis Group. P: 197-215.

Tokle, T., Mao, Y. & McClements, D. J. (2013). Potential biological fate of emulsion-based delivery systems: lipid particles nanolaminated with lactoferrin and β-lactoglobulin coatings. Pharmaceutical Research, 30 (12), 3200-3213.

Triki, M., Herrero, A. M., Rodríguez-Salas, L., Jiménez-Colmenero, F. & Ruiz-Capillas, C. (2013). Chilled storage characteristics of low-fat, n-3 PUFA-enriched dry fermented sausage reformulated with a healthy oil combination stabilized in a konjac matrix. Food Control, 31 (1), 158-165.

Viljanen, K., Kivikari, R. & Heinonen, M. (2004). Protein− lipid interactions during liposome oxidation with added anthocyanin and other phenolic compounds. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52 (5), 1104-1111.

Wandrey, C., Bartkowia, A. & Harding, S. E. (2010). Materials for encapsulation. In encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. Zuidam NJ. and Nedovic VA.. Springer, NY., 31-100.

Wang, B., Siahaan, T. & Soltero, R. (2005). Drug Delivery: Principles and Applications, John Wiley & Sons.

Wang, G. (2005). Liposomes as drug delivery vehicles (pp. 411-434). John Wiley and Sons, Inc.

Wang, M., Wang, C., Gao, F. & Guo, M. (2018). Effects of polymerised whey protein-based microencapsulation on survivability of Lactobacillus acidophilus LA-5 and physiochemical properties of yoghurt. Journal of Microencapsulation, 35 (5), 504-512.

Xiao, Z., Liu, W., Zhu, G., Zhou, R. & Niu, Y. (2014). A review of the preparation and application of flavour and essential oils microcapsules based on complex coacervation technology. Journal of the Science of Food and Agriculture, 94 (8), 1482-1494.

Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S. & Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science & Technology, 17 (10), 524-534.

Zuidam, N. J. & Shimoni, E. (2010). Overview of microencapsulates for use in food products or processes and methods to make them. İn Zuidam NJ, Nedovic V (eds): Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing, New York: ABD, Springer, pp. 3-29.