



## Mikroenkapsülasyon ve Süt Teknolojisindeki Yeri

Merve Açu , Oktay Yerlikaya, Özer Kınık

Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Süt Teknolojisi Bölümü, Bornova, İzmir

*Geliş Tarihi (Received): 29.10.2013, Kabul Tarihi (Accepted): 07.12.2013* Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): [merve.acu@ege.edu.tr](mailto:merve.acu@ege.edu.tr) (M. Açu)

☎ 0 232 311 27 33 / 19 📠 0 232 342 57 13

### ÖZET

Mikroenkapsülasyon, sıvı veya gaz taneciklerin polimer kapsüller veya ince bir film tabakası ile kaplanarak korunmasıdır. Mikroenkapsülasyondaki amaç; kaplanan maddeyi çevre koşullarından korumak ve stabilitesini sağlamaktır. Sindirim sisteminden geçerken zarar görebilen bazı ilaç ve probiyotik mikroorganizmalar mikroenkapsüle edildiklerinde fizikokimyasal, kimyasal olaylardan ve çevrenin mekanik etkisinden zarar görmezler. Ayrıca bazı durumlarda enzim ve katalizörlerin de ortamda serbest bulunması istenmeyen bir durumdur. Mikroenkapsülasyon ile bu bileşenlerin açığa çıkması sınırlandırılabilir veya duruma göre daha hızlı açığa çıkmaları sağlanabilir. Püskürterek kurutma, püskürterek yataкта kurutma, püskürterek soğutma, püskürterek dondurma ve melt enjeksiyon gibi birçok enkapsülasyon tekniği vardır. Mikroenkapsülasyonun süt teknolojisinde önemli bir yeri bulunmaktadır. Özellikle peynir teknolojisinde tat ve aroma maddeleri için son derece önemlidir. Yapılan araştırmalarda enkapsüle enzim içeren peynirlerin tat, aroma ve tekstürel değerlerinin daha yüksek olduğu; hızlı ve aşırı proteolizin de önlenildiği belirlenmiştir. Dondurmada ise laktik asit bakterileri üzerindeki olumsuz etkileri ortadan kaldırmak amacıyla laktobasiller tutuklanarak enkapsüle edilebilir ve böylece dondurmadaki canlı probiyotik sayısı artırılabilir. Süt yağının ise mikroenkapsülasyon ile dayanıklılığının artırılması ve dolayısıyla raf ömrünün uzatılması çalışmaları gerçekleştirilmiştir; olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Tereyağında da alternatif bir yöntem olan mikroenkapsülasyonla hem süt yağının hem de tereyağı aromasının bir kısmı enkapsüle edilebilir. Süt ve ürünlerinin demir yönünden zenginleştirilmesinde de mikroenkapsülasyon önemli bir tekniktir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikroenkapsülasyon, Süt teknolojisi, Probiyotik, Biyoaktif bileşenler

### Microencapsulation in Dairy Technology

#### ABSTRACT

Microencapsulation is a covering process of solid, liquid or gas particules with polymer capsules or a thin film layer to protect these molecules from environment conditions and provide the stability. Several bioactive components in food products such as fat, enzymes, vitamins and minerals, some probiotic microorganisms and medicine that may be damaged in gastrointestinal tract, could be protected with microencapsulation. Also, arise of enzyme and catalyzators, that are not desired to be free in environment, could be limited or could be fastened as occasions requires. It can be said that encapsulation was a process to entrap active agent within another substance. In encapsulation technology, numerous wall materials such as carbonhydrates, gums, milk fat, proteins and protein based components; celluloses (carboxymethylcellulose, methyl cellulose, ethyl cellulose, nitro cellulose, acetyl cellulose, cellulose acetate butyrate) are used. There are many encapsulation techniques such as spray-drying, spray-bed-drying, fluid-bed coating, spray-chilling, spray-cooling, freeze-drying, extrusion, vacuum and melt injection. There is an important role of microencapsulation in dairy technology. In particularly, microencapsulation applications are very significant for flavour and aroma agents in cheese technology. It was reported that flavour, aroma and texture values of cheeses that include encapsulated enzyme was higher. Also it was seen that microencapsulation had prevented fast and extreme proteolysis in these chesses. In ice-cream, lactobacillus could be captured by encapsulation to remove the negative

effects on lactic acid bacteria and so that alive probiotic microorganism count can be enhanced in ice cream. Studies about increasing resistance of milk fat and therefore prolonging the shelf life were done and positive results were found. Furthermore, it could be said that microencapsulation which is an alternative method in butter, both some aroma of milk fat and butter could be encapsulated. Also, microencapsulation is a significant technique for iron fortification in milk and milk products.

**Key Words:** Microencapsulation, Dairy technology, Probiotic, Bioactive components

## GİRİŞ

Mikroenkapsülasyon, sıvı veya gaz formundaki zerreciklerin ince bir film tabakası ya da polimer kapsüller ile kaplanarak, kaplanan materyalin kullanılıncaya kadar korunması işlemidir. Kaplamada kullanılan materyalin özelliklerine bağlı olarak kaplanan madde (mikroorganizma veya gıda bileşeni) farklı sürelerde ve ortamlarda serbest hale geçebilir. Mikroenkapsülasyon enkapsüle edilen madde ile sistemin ilişkisini sınırlandırmaktır. Eğer bir bileşenin bulunduğu ortam ile ilişkisinin sınırlandırılması gerekiyorsa, bu maddenin enkapsüle edilmesi ile elde edilen mikrokapsüller sayesinde ortamdan ayrılması daha kolay olmaktadır. Bu yöntemde kullanılan kapsüller, içeriklerini koruma ve istenildiğinde gerekli koşulların sağlandığı ortamlarda çalışabilme özelliğine sahiptirler [1]. Mikroenkapsülasyon işlemi gıda, tarım, ilaç, enerji ve savunma gibi alanlarda kullanılmaktadır [2]. Bu derlemede de mikroenkapsülasyon teknikleri ve mikroenkapsülasyon işleminin süt teknolojisindeki yeri anlatılacaktır.

## MİKROENKAPSÜLASYON

Mikroenkapsülasyon, kırılabilir ve çevresinden korunması gereken vitaminler, çoklu doymamış yağ asitleri gibi gıda bileşenlerinin korunmasını sağlar. Mikroenkapsülasyondaki temel amaç; gıda bileşenlerini, kötü çevre koşullarından korumak, stabilitesini sağlamak ve kontrollü olarak kullanımını gerçekleştirmektir. Bazı ilaçlar ve probiyotikler sindirim sisteminden geçerken zarar görebilirler. Bu maddeler mikroenkapsüle edildiklerinde fizikokimyasal, kimyasal ve çevrenin mekanik etkisinden korunabilirler. Ayrıca bazı durumlarda enzim ve katalizör gibi bileşenlerin ortamda serbest halde bulunması istenmez. Mikroenkapsülasyon bu bileşenlerin açığa çıkmasını sınırlar veya daha hızlı açığa çıkmalarını sağlayabilir. Biyoaktif maddelerin enkapsülasyonu bu maddelerin raf ömürlerini uzatır ve biyo-yararlılıklarını artırır [3].

Bu teknikte kullanılan ve mikrokapsül olarak isimlendirilen minyatür paketlerin genişlikleri  $\mu$  büyüklüğünden birkaç milimetreye kadar değişiklik gösterebilmektedir [1]. Bu yöntemde hücreler 0.45  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük gözenekleri olan 5-300  $\mu\text{m}$  çapındaki kaplama maddesinin içerisinde tutulur [2]. İlgili araştırmalarda bu mikrokapsüllerin ideal şekillerinin küre olarak kabul edildiği bildirilmektedir. Söz konusu teknikte, enkapsülasyonu oluşturan aktif kısmın çekirdek, iç faz veya dolgu olarak; enkapsülasyon materyalinin ise, kabuk kaplama maddesi ya da duvar materyali olarak isimlendirildiği ifade edilmektedir [1].

Mikroenkapsülasyonun temel nedenleri şöyle özetlenebilir:

1. Uyumsuz bileşikler ayırmak
2. Sıvıların katı hale getirilmesi
3. Stabilitiyi artırma (çevreden gelen oksidasyon ve deaktivasyona karşı mikroenkapsüle materyali korumak)
4. Mikroenkapsüle edilen materyalin tadını kokusunu ve aktivitesini maskeleyen
5. Mevcut çevrenin korunması
6. Aktif bileşiklerin, kontrollü olarak açığa çıkarılması
7. Mikroenkapsüle materyallerin hedeflendiği şekilde salınmasıdır [2].

Esas olarak mikroenkapsülasyon tekniği, doğal ingrediylentlere yararlı spesifik özellikler kazandırabilmekte ve gıda endüstrisinde çok farklı amaçlar için kullanılabilir. Depolama sırasında tat ve koku maddeleri kayıplarını önlemek, aroma maddeleri arasında meydana gelebilecek arzu edilmeyen etkileşimleri ve yine aroma maddeleri arasında görülebilen oksidatif bozulmaların önüne geçebilmek, aroma maddelerinin ortama kontrollü salınımını sağlamak ve bu salınım hızını kontrol edebilmek, ayrıca bununla birlikte beslenme ile ilgili olan kayıpların önlenmesini sağlamak bunlardan bazılarıdır [1].

## MİKROENKAPSÜLLERİN OLUŞTURULMASINDA KULLANILAN KAPLAMA MATERYALLERİ

Mikroenkapsülasyon teknolojisinde kullanılan kapsüllerin genel olarak stabilitelelerinin yüksek, geçirgenliklerinin uygun, boyutlarının istenen düzeyde ve ortamla uyumluluğunun yüksek olması istenir. Bu özelliklerin oluşturulabilmesi için çok farklı kaplama materyalleri kullanılmaktadır. Bunlar; karbonhidratlar, gımlar, süt yağı, proteinler ve protein esaslı bileşenler, selülozlar (karboksimetilselüloz, metil selüloz, etilselüloz, nitroselüloz, asetilselüloz, selüloz asetatfitalat, selüloz asetat-bütülat-fitalat), lipidler, katı ve sıvı yağlar ve inorganik maddelerdir [3].

İdeal bir kaplama materyali; toksik olmamalı, kolay uygulanabilmeli, tam koruma sağlamalı, enkapsüle edilen materyal ile reaksiyona girmemeli ve ekonomik olmalıdır. Sıralanan bütün özellikleri taşıyan bir kaplama materyali olmadığı için, kaplama materyalleri pratikte diğer kaplama materyalleri ile ve/veya oksijen tüketiciler, antioksidanlar, şelat ajanları ve biyosüfaktanlar gibi tamamlayıcılar ile birlikte kullanılmaktadır [2].

## Karbonhidratlar

Karbonhidratların özellikle gıda katkı maddelerinin püskürterek kurutma yöntemi ile enkapsüle edildiği uygulamalarda geniş kullanım alanları vardır. Nişasta, maltodekstrin ve mısır şurubu çeşitliliği, düşük maliyeti ve gıdalarda geniş kullanım alanları olması nedeniyle aroma maddelerinin kaplanması tercih edilmektedirler [4].

Örneğin, maltodekstrinler enkapsüle edilmiş yağ oksidasyondan korur ancak emülsifiye etme kapasitesi ile emülsiyon stabilitesi düşüktür. Pektin düşük konsantrasyonlarda stabil bir emülsiyon sağlayabilen bir polimerdir. Pektinin emülsifiye edici özellikleri pektin zincirindeki protein kalıntıları ve asetil gruplarından kaynaklanmaktadır [5].

## Gamlar

Gamlar ve kıvam verici maddelerin tadı genellikle çok azdır veya hiç yoktur. Fakat gıdaların tat ve aromalarında belirgin bir etkiye sahiptirler. Akasya gamı (gum arabic) yüksek çözünürlüğü, düşük viskozitesi ve emülsiyon haline getirme özellikleri ile enkapsülasyon teknolojisinde aranan aroma kaplama maddelerindendir [4].

Şimdiye kadar mikroenkapsülasyonda en yaygın olarak kullanılan kaplama materyali biyogam aljinattır. Mikroenkapsüle edici destek olarak aljinat kullanımının, toksik olmaması, kolay temin edilebilir olması, mekanik stabilitesi iyi ince jeller oluşturması, alkali tampon çözeltide süspansiyon olduğunda kolaylıkla açığa çıkması ve kalsiyum klorür ile probiyotik bakteriler gibi duyarlı materyalleri kaplamada hafif matrisler oluşturması gibi avantajları vardır. Ancak aljinat bazen tek başına yeterli olmamaktadır. Yapılan birçok çalışmada, aljinatı başka bir destek materyaliyle daha kaplamanın probiyotikleri korumada daha etkili bir yol olduğu bildirilmiştir [2].

## Süt Yağı

Süt yağından elde edilen mikrokapsüller, aroma maddeleri ve enzimlerin enkapsülasyonunda kullanılmaktadır. Süt yağının peynirde aroma maddelerinin ön maddesi olup peynir aromasının taşınmasını sağlar. Süt yağı içerisine enkapsüle edilmiş bileşenlerin az yağlı peynirlerde kullanılması bu peynirlere tam yağlı lezzeti vermektedir [4].

## Proteinler

Gıda hidrokolloidlerinin yanı sıra sodyum kazeinat, peyniraltı suyu proteinleri, proteinleri ve soya protein izolatları gibi gıda proteinlerinin de enkapsülasyon teknolojisinde kullanım alanları vardır. Suda çözünen ve çözünmeyen grupları birlikte içermeye, kendi içinde ve çok çeşitli maddelerle etkileşime girme, büyük molekül ağırlıkları, moleküler zincirlerinin esnekliği, çözünürlük gibi teknolojik özelliklerinin bulunması tercih edilme sebeplerindendir. Emülsiyon oluşturma sırasında protein molekülleri yeni oluşan yağ ve su fazı arasında hızlıca

adsorbe olur. En yaygın kullanılanlara kazein, jelatin ve gluten örnek olarak verilebilir [4].

## Diğer Kaplama Materyalleri

Mikroenkapsülasyon teknolojisinde selülozlar (karboksimetilselüloz, metil selüloz, etilselüloz, nitroselüloz, asetilselüloz, selüloz asetat-fitalat, selüloz asetat-bütilat-fitalat), lipitler (mumlar, parafin, tristearin, stearik asit, monogliseritler, digliseritler, balmumu, katı ve sıvı yağlar, katılaştırılmış yağlar), inorganik maddeler (kalsiyum sülfat, silikatlar, kil) ve lipozomlar da kaplama materyali olarak kullanılmaktadır [3].

## MİKROENKAPSÜLASYON TEKNİKLERİ

Gıda bileşenlerinin enkapsülasyonu için birçok yöntem mevcuttur. Enkapsüle edilen bileşenler genellikle sıvı formunda oldukları için çoğu yöntem kurutma esasına dayanır. Püskürterek kurutma, püskürterek yatakta kurutma, püskürterek soğutma, püskürterek dondurma ve melt enjeksiyon enkapsülasyon tekniklerinden bazılarıdır.

## Püskürterek Kurutma

Gıda sektöründeki en eski ve en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntem esnek ve süreklidir; ancak daha da önemlisi ekonomik bir prosesdir. Bu yöntemle elde edilen partiküllerin yapısı kalitelidir ve boyutları 40 µm'den daha küçüktür [4]. Yöntemde uygulanan proses, işlemin gerçekleştirileceği emülsiyonun ve dispersiyonun hazırlanması, hazırlanan dispersiyon ve emülsiyonun homojenizasyonu ile elde edilen homojen kitlenin kurutma hücresindeki otomizasyonunu kapsayan üç aşamada gerçekleştirilir. Proses, işlemin uygulanacağı çözeltinin, atomize edilecek materyalin kaplama ajanı çözeltisi içindeki dispersiyonu ve emülsiyonu ile hazırlanmaktadır. Burada kaplama materyali olarak jelatin, modifiye nişasta, dekstrin, ya da jelleşme özelliği göstermeyen bir hidrokolloid kullanılmaktadır [1]. Tekniğin bu özelliği ürünlerin duyuşal ve tekstürel kalitesi açısından istenen bir olgudur.

Püskürtmeli kurutma yöntemi ile enkapsülasyon gıda endüstrisinde yağ, aroma maddeleri ve antioksidanlar gibi gıda bileşenlerinin kaplanması ve sıvı ürünlerin toz formuna dönüştürülmesinde kullanılır [6].

Püskürtmeli kurutucular gıda sektöründe oldukça yaygın kullanımına rağmen, bu tekniğin tekdüze bir işlem sağlayamaması ve partikül büyüklüğünün her zaman kolaylıkla kontrol edilememesi gibi olumsuzlukları da vardır. Enkapsüllerin yaklaşık %80-90'ı püskürtmeli kurutucularla yapılırken, geriye kalanlarında çoğunlukla püskürtmeli soğutma, dondurarak kurutma, melt ekstrüzyon ve melt enjeksiyon yöntemleriyle hazırlanır [4].

## Püskürtmeli Soğutma/Serinletme

Lipid kaplı aktif bileşikler üretebilmek için kullanılan teknolojilerdir. Bu iki teknik arasındaki fark lipidlerin erime noktasıdır. Püskürtmeli serinletmede sıcaklık 34-42°C arasındayken, soğutmada daha yüksektir. Ajan madde lipidlerde çözünebilmeli, kuru formda ya da sulu emülsiyon halinde bulunmalıdır. Püskürtmeli serinletmede hem kesikli hem sürekli proseslerle daha yüksek oranda verim sağlanabilir. Serinletmede ise partiküller düşük sıcaklıklarda tutulur [4].

## Ekstrüzyon

Ekstrüzyon daha çok düşük sıcaklıkta uygulanan enkapsülasyon yöntemi olarak bilinmektedir. Proses çözünmüş halde bulunan karbonhidrat kütlesinin katı formdaki maddelerin enkapsülasyonu esasına dayanmaktadır [1]. Bu yöntem ısıya duyarlı materyallerde de kullanılabilir [7]. Ekstrüzyon yöntemi özellikle uçucu ve stabil olmayan tat maddelerinin camsı karbonhidrat matrikslerle enkapsülasyonunda kullanılır. Çok iyi amfifilik özellikteki hidrofobik modifiye nişastalar da karbonhidratların yerine kullanılabilir. Bu yöntemin en önemli avantajı turunç yağı gibi oksidasyon eğilimli tat maddelerinin raf ömrünün uzatmasıdır. Oksijeni geçirmeyen bir bariyer olduğundan dolayı atmosfer ortamı hidrofilik camsı matriksten çok yavaşça geçer. Püskürterek kurutma yapılan uçucu yağların raf ömrü 1 yıl ve enkapsüle edilmeyenlerinki birkaç ay iken ekstrüde uçucu yağların raf ömrünün 5 yıla kadar çıktığı belirtilmiştir. Bu yöntemin dezavantajlarından birisi de oldukça büyük partiküllerin (500-1000 µm) işlenmesidir. Bu durum da ekstrüde materyallerin kullanımını kısıtlamaktadır. Aynı zamanda ekstrüzyon yöntemi için çok kısıtlı sayıda kaplama materyali kullanılabilir. Temel olarak bütün malzemeler beraberce karıştırılır ve %20 kadar suyla ekstrüdere verilir. Karışım iki vidalı ekstrüdere verilir ve çıkanlar 0.5-1.5 mm boyutlarında parçalara bölünür ve dayanıklı mikrokapsüller elde edebilmek için havayla kurutulur. Bu işlem *Lactobacillus acidophilus* gibi ısıya karşı hassas olan mikroorganizmalarda kullanılabilir (çok yüksek sıcaklıklardaki işlemlerde tipik karbonhidrat matriksi kullanılmaz [7]. Harz, Heinzl, Schöner, Betz, and Keßler [8] enzimlerin enkapsülasyonu için daha düşük sıcaklıkta uygulanabilen mısır nişastası/yağ ya da mısır nişastası/poli-etilen glikol kombinasyonlarının uygulandığı bir yöntem belirlemişlerdir. Bu yöntemde karışım ekstrüdere 40°C'de verilir ve sadece birkaç saniyelik silindirde 100°C'de işlem görür 2-3 kereden 45°C'ye soğutulur. Çıkanlar 500-1000 µm boyutlarındaki parçalara bölünür. Ekstrüde kısımdaki çok düşük miktardaki su enzimlerin degradasyonunu engeller [7].

Akışkan yatak prosesi (hava süspansiyon kaplama) kesikli veya sürekli bir sistemde kaplama materyalinin toz partiküllere uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Toz partiküller belirli bir sıcaklık ve hava akımında atomize edilmiş kaplama materyaliyle kaplanır. Kaplama materyali selüloz, nişasta türevleri, protein veya gamların sulu çözeltileri olabilir [4]. Prensipte, kesikli veya sürekli bir sistemde yukarıya doğru hareketle ısıtılan ya

da soğutulan hava akımı içerisindeki nüve materyalinin asılı olarak tutulmasına dayanmaktadır. Bu yöntemde erimiş ya da buharlaştırılabilen bir çözücü içinde bulunan çözünmüş kaplama maddeleri vardır. Kaplama maddesi hücre içine bir meme aracılığıyla atomize edildikten sonra asılı partiküllerin yüzeyinde çok ince bir sınır tabakası oluşmaktadır. Asılı durumdaki partiküller hava akımı en üst noktaya ulaştığında dışarıya doğru hareket edip aşağıya doğru olan hava kolonu ile akışkan yatak kurutucuya ulaşmakta ve burada kaplama materyali kuruyarak sertleşmektedir [1]. Sistemde soğuk hava solvent bazı kaplamalar için, sıcak hava ise uçucu bileşenler için kullanılır [6].

## Dondurarak Kurutma

Dondurarak kurutma işlemi ürünün dondurulması ve buz kristallerinin süblimasyonla üründen uzaklaştırılması temeline dayanmaktadır. Dondurarak kurutma üç aşamada gerçekleşir. Dondurma, şoklama veya derin dondurucuda gıdadaki suyun buz kristalleri haline dönüştürülmesi aşamasıdır. Temel kurutma, buz kristallerinin süblimasyonla üründen uzaklaştırılmasıdır. İkinci kuruma ise, gıdadaki bulunan bağlı suyun uzaklaştırılmasıdır. Dondurarak kurutma ve vakum birbirine çok benzeyen kurutma prosesleridir, ancak vakum kurutmada çözücünün donma noktasının üstündeki bir sıcaklıkta çalışıldığı için daha hızlı ve daha ucuzdur [4].

## Santrifüj ile Suyun Uzaklaştırılması

Bu yöntem daha çok vitamin üreticileri, özellikle de A vitamin asetat (vitamin A asetat) üreticileri tarafından kullanılmaktadır. Yöntemin uygulandığı enkapsülasyon başlığı ortak bir merkeze sahip beslenme tüpünden ibaret olup kaplama ve çekirdek maddesi bu tüp içerisinde aletin dış yüzeyinde bulunan memelere ayrı ayrı pompalanmakta ve proseste yer alan nüve materyali dıştaki tüpün içerisinden akmaktadır. Nüve materyali proses sırasında merkezde yer alan tüpün içerisinden akarken kaplama materyali dışta yer alan tüpün içerisinden akmaktadır. Bu aşamada sıvı, çubuk şeklindeki kaplama maddesi içerisinden bulunmakta ve santrifüj kuvveti etkisiyle bu kaplama maddesi dışarıya doğru itilerek kaplama maddesinin çok ince parçacıklara ayrılması sağlanmaktadır. Söz konusu bu olay sırasında meydana gelen yüzey tansiyonu nüveyi çevreleyerek enkapsülasyon işleminin tamamlanmasını sağlamaktadır [1].

## Koaservasyon

Koaservasyon yöntemi polimer özellik gösteren bir çözeltiden kaplama materyaline ait sıvı fazın ayrılması ve bu fazın asılı çekirdek partikülleri etrafında üniform bir tabaka halinde tutulması içermektedir. Yöntemde çekirdek ve kaplama materyalinin yüzey enerjileri, sıcaklık, pH ve bileşimleri gibi bazı sistem özellikleri değiştirilerek kümeleşmeleri sağlanmaktadır. İşlem tamamlandıktan sonra mikrokapsüller filtrasyon ve santrifügasyon gibi ayırma tekniklerinden biri kullanılarak ortamdan ayrılmakta ve daha sonra da tek

tek pariküller standart bir teknik kullanılarak kurutulmaktadır [6]. Yapılan bir çalışmada hidrolize kazein koaservasyon yöntemi ile mikroenkapsüle edilmiştir. Kaplama materyali olarak soya proteini izolatu ve pektin kompleksi kullanılarak örneklerin nem çekme ve acılık değerlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Hidrofobik özellik mikrokapsül içindeki hidrolizat miktarı ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Çalışma sonunda kapsülleme verimliliğinin %78.8-91.62 arasında olduğu belirlenmiştir. Duyusal panel testlerine göre, kapsüllü örneklerin serbest hidrolizattan daha az acı tada sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada koaservasyon yöntemiyle mikroenkapsülasyonda soya proteini ve pektin karışımının etkin bir kaplama materyali olduğu ayrıca hidrolizatın acı tadının giderilmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir [6].

### Kompleks Oluşturma

Kompleks oluşturma yöntemi enkapsülasyon ajanı olarak siklodekstrin kullanılmaktadır. Siklodekstrin yapılarının en önemli özelliği yapının orta kısımlarında bulunan belli boyutlardaki boşluklardır. Sikloheksanın halka yapısında dış tarafa doğru yer alan hidroksil gruplarına karşın merkezdeki proton yoğunluğu molekülün bu bölümüne hidrokarbon özelliği kazandırmaktadır. Bu özellikteki siklodekstrinlerin hidrofobik moleküller ile stabil kompleksler oluşumu sağlanmaktadır. Komplekslerin oluşumunda suya ihtiyaç olup oldukça kararlı bir yapı gösteren kompleks çözüldükten siklodekstrinlerin uzaklaştırılması, çöktürme ile gerçekleşmekte, filtrasyon ile ortamdan alınarak alışımlı yöntemler ile kurutulmaktadır.

### Kokristalizasyon

Kokristalizasyon yöntemi enkapsülasyon yöntemleri arasında en önemli ve en çok kullanılanlardandır. Diğer yöntemlere göre daha basit, daha ucuzdur. Bu yöntemde yapıda doğal olarak bulunan sakkaroz kristalleri değerlendirilmektedir. Sakaroz a ait tipik kristaller katı formda yer almakta ve çok doymuş solüsyonlardan sakkaroz kristalize edilebilmektedir [1].

### Lipozom Dağıtma

Lipozom dağıtma yöntemi de bir diğer enkapsülasyon yöntemidir. Fosfolipidler suda dağıtıldığında kendiliğinde oluşan küre şeklindeki kabarcıklara lipozom denir. Gıda ve beslenme endüstrisinde lipozomlar enzim, vitamin ve antioksidanların stabilitesini arttırmak için kullanılmaktadırlar. Lipozomların hidrofilik ve hidrofobik molekülleri tutma yetenekleri tarım ve beslenme endüstrisinde taşıma sistemi olarak yararlanılmalarına olanak sağlamıştır. lipozomların diğer mikroenkapsülasyon yöntemlerine (püskürterek kurutma, akışkan yatak v.b.) göre en büyük avantajı, yüksek su aktivitesi uygulamalarında koruyucu özelliğini kaybetmemesidir.

Bir çalışmada lipozomlar içinde enzimin tutuklanmasıyla ilgili olarak mikroenkapsülasyon tekniği kullanılmış ve bu teknik yardımıyla Saint-Paulin peynirinin olgunlaşması gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar söz konusu peynirde bu şekilde yapılan bir işlem ile olgunlaşmanın hızlı olarak gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Söz konusu araştırmada, iyonik lipozomların nötral lipozomlardan daha fazla enzim tutabilme yeteneğine sahip olduğu belirtilmiştir [6].

Tablo 1.Gıda Bileşenleri için enkapsülasyon yöntemleri [9]

Enkapsülasyon Yöntemi	Gıda Bileşenleri
Püskürtmeli kurutma	Vitaminler, tat maddeleri, starter kültürler, karotenoidler, yağlar
Püskürtmeli soğutma/serinletme	Demir sülfat, vitaminler, mineraller
Ekstrüzyon	C vitamini, tat maddeleri
Akışkan yatak	C vitamini, sitrik asit, laktik asit, sorbik asit, sodyum bikarbonat
Lipozom dağıtma	Hormonların, enzimlerin ve vitaminlerin vücuda taşınmasında
Koaservasyon	A vitamini

### BİYOAKTİF BİLEŞENLER

Biyoaktif bileşenlerin mikroenkapsülasyonunda esas olan bu bileşenlerin fonksiyonelliğini sürdürebilmeleri için kimyasal degradasyondan (oksidasyon, hidroliz gibi) korumaktır. Bu kimyasal degradasyonun önlenmesi gastrointestinal sistem için çok önemlidir. Biyoaktif gıda bileşenlerinin etkili bir şekilde taşınmasındaki sorun sadece gastrointestinal sistemden geçerken değil aynı zamanda depolama boyunca gıdada da geçerlidir. Birçok gıda bileşeni eklenen biyoaktif bileşiğin biyoaktivitesini engelleyebilir. Budan dolayı enkapsülasyon işlemi biyoaktif bileşikler işleme, depolama ve taşıma gibi bütün aşamalarda koruyabilmelidir. Bir başka durum ise enkapsülasyonun etkili bir paketleme sistemi olmasıdır. Bu paketlemenin etkinliği biyoaktif bileşenin çeşidine ve de kaplama materyaline bağlıdır. Probiyotikler gibi büyük yapıların

kaplanması vitaminler gibi daha moleküler yapıların kaplanmasından daha fazla etkinlik gerektirir. Enkapsülasyon sistemi seçilirken, gıdanın tat ve tekstürünü olumsuz etkilemeyecek bir sistem göz önünde bulundurulmalıdır. Biyoaktif bileşen sindirim sisteminin belirli bir bölgesinde bırakılmalıdır.

Endüstriyel anlamda enkapsüle edilen biyoaktif gıda bileşenleri lipidler, proteinler ve karbonhidratlardır. Bu bileşenler genellikle mide ve onikiparmak bağırsağının yüksek asitliği ve enzim aktivitesine dayanmaları için enkapsüle edilirler.

Lipidler organik çözücülerde çözünebilir gıda bileşenleridir. Yağ asitleri, fosfolipidler, karotenoidler ve yağda çözünen vitaminler bu sınıfta yer alır.

Lipidler mikroenkapsülasyon işlemleri için gayet uygundur. Sudaki aşırı düşük çözünürlüklerinden dolayı gıdalarda da kolaylıkla çözülemez; ve oksidasyona karşı aşırı duyarlı olan çoklu doymamış yağ asitleri de oksijene karşı etkili bir bariyer oluşturan enkapsülasyon teknikleriyle toz ürünlerde çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Biyoaktif proteinler de enkapsülasyonun gerektiği ikinci bir gruptur. Gıda kaynaklı birçok peptid büyüme faktörü, anti-hipertansif madde, antioksidan ya da bağışıklık düzenleyici faktör olarak işlev görür. Bu proteinlerin bazılarının insan sağlığına yararlı olabilmesi için ince bağırsakta belirli bir seviyede olması gerekir. Proteinlerin sindirim sisteminde biyodegradasyona karşı en hassas biyoaktif bileşikler olduğu söylenebilir. Ancak bu durum her zaman bütün proteinlerin enkapsüle edilmesi gerektiği gibi algılanmamalıdır. Hatta çoğu peptidin belirli biyoaktif peptid veya aminoasitlerini açığa çıkarabilmesi için mide ve ince bağırsakta hidroliz olması gerekir. Böylece proteinlerin enkapsülasyonun proteinin çeşidine, öngörülen sağlık etkisine ve biyoaktif protein için taşıyıcı görevi yapacak olan ürüne bağlı olduğu söylenebilir.

Enkapsülasyondan yararlanma amaçlanan üçüncü ve sonuncu biyoaktif bileşen grubu ise karbonhidratlardır. Biyoaktif karbonhidratlar diyet liflerinde bulunmaktadır. Bu lifler çeşit, polisakkaritlerin taşınması ve monosakkaritlerin miktarları bakımından çeşitlilik göstermektedir. Enkapsülasyondan en çok yararlanan lifler veya onların bileşenleri sindirilemeyen polisakkaritlerdir. Bu liflerin kolesterol düşürülmesinde, glisemik çıkışlarının düşürülmesinde, kabızlığın önlenmesinde, prebiyotik etkileri için ve hatta kanserden korunmada da kullanıldığı bilinmektedir [10].

## MİKROENKAPSÜLASYONUN SÜT TEKNOLOJİSİNDEKİ KULLANIMI

Mikroenkapsülasyon tekniği ile ilgili olarak özellikle 1980'li yılların sonlarında yapılan araştırmalarda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda, özellikle peynir teknolojisi ile diğer süt ürünlerinde kalite kriterlerini ortaya koyan tat ve aroma maddelerinin gelişimleri ve bu kriterlerin belli düzeyde korunabilmeleri için söz konusu tekniğin önemli bir konuma sahip olduğu tespit edilmiştir [1].

### Peynir Teknolojisinde Mikroenkapsülasyon

Olgunlaşma süresini kısaltmak amacıyla uygulanan işlemlerdeki temel prensip; tat ve aroma oluşturan mikroorganizmaların ya da enzimlerin faaliyetlerini, yani kısaca bunlara ait biyokimyasal değişimlerin hızlandırılmasına dayanmaktadır. Peynirlerin hızlı olgunlaştırılması, depolanmanın sınırlı olduğu durumlarda peynir üretim kapasitesinin artırılmasında önemli bir araçtır [1].

Peynirde olgunlaşmanın hızlandırılması için, ilk uygulanan yöntemler, depolama sıcaklığının

yükseltilmesi, süte istenilen özellikte gelişme sağlayan mikroorganizmaları içeren starter kültürlerin ilave edilmesi veya bu iki yöntemin birlikte uygulanmasıdır. Olgunlaşma süresini kısaltmak amacıyla uygulanan işlemlerdeki temel prensip; tat ve aroma oluşturan mikroorganizmaların ya da enzimlerin faaliyetlerini, yani kısaca bunlara ait biyokimyasal değişimlerin hızlandırılmasına dayanmaktadır [6].

Son yıllarda peynirlerde istenilen düzeylerde tat ve aromanın gelişimi için, istenen özelliklere sahip substratı enkapsüle edebilecek bir sistem geliştirilmiş ve uygulamada yerini almıştır. Bu sistemde elde edilen mikrokapsüller, süte pıhtılaşmasından önce ilave edilerek tat ve aromayı oluşturu ürünlerin peynirin olgunlaşması sırasında kapsüller içerisinde olmasını sağlanmaktadır. Bu şekilde enzim ya da starter kültürün direk olarak peynir ile teması kesilmekte ve bu faktörlerden meydana gelebilecek olumsuz gelişmeler önlenmektedir [1].

Beyaz peynirde yapılan bir çalışmada, probiyotik kültür olarak *Bifidobacterium bifidum* BB-12 ve *Lactobacillus acidophilus* LA-5 suşları kullanılmıştır. Ürün içerisinde, enkapsüle edilmeyen kültürlerin edilenlere göre sayılarının daha kısa sürede azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca asetaldehit ve diasetil gibi tat ve aroma bileşenlerinin enkapsüle kültür içeren peynirlerde daha yoğun olduğu tespit edilmiştir [6].

Sert peynirlerde mikroenkapsülasyon uygulamaları ile proteinler ve yağların yavaş ve dengeli bir şekilde indirgenmesi sonucu; bu tip peynirlerde tat ve yapının geliştiği tespit edilmiştir. Sert peynirlerde gözlenen bu olgunlaşma prosesinde, olgunlaşmakta olan peynirin özenle seçilmiş bir sıcaklıkta yaklaşık olarak bir yıl süreyle muhafaza edilmesi gerekmektedir. Yumuşak ve orta sertlikteki peynirlerde ise süre, ortalama 4 ile 6 ay arasında olmaktadır.

Peynirlerde olgunlaşma döneminde çok önemli değişimlerin meydana geldiği ve bu değişimlerin esas olarak mikrobiyal enzimlerden (endopeptidaz ve ekzopeptidaz) kaynaklandığı belirlenmiştir. İşte bu amaçla laboratuvarlarda yapılan araştırmalarda, bu iki tip enzim kombine edilerek mikroenkapsülasyon tekniği ile söz konusu olgunlaşma süresinin azaltılmasına çalışılmıştır. Araştırma sonucunda bu anlamda başarı kazanılarak olgunlaşma süresi azaltılmış ve depolama masrafları azaltılabilmektedir. Mikroenkapsülasyon tekniği yardımı ile gerçekleşen ve enkapsüle enzimlerin kullanımıyla olumlu sonuçlar veren bu uygulamalar, daha da geliştirilerek günümüzde hemen hemen tüm peynir tiplerinde kullanılmaya başlanmıştır. Peynirlerde tespit edilen tekstürel problemlerin tamamının ortadan kalktığı belirlenmiştir [1].

Yapılan bir çalışmada da Cheddar peynirinin olgunlaşmasını hızlandırmak amacıyla ilave edilen aminopeptidaz enzimine mikroenkapsülasyon işlemi uygulanmıştır. Bunun için kaplama materyali olarak aljinat-kitosan-kalsiyum klorür (%1.6-0.1-0.1 a/a) kompleksi seçilmiştir. Yapılan bu çalışmada enzim eklenmeyen (kontrol grubu), serbest halde ve enkapsüle

edilen aminopeptidaz enzimi içeren peynir örneklerinin duyuşal özellikleri ve proteoliz düzeyleri karşılaştırılmıştır. Enkapsüle edilen enzim içeren peynirlerin tat, aroma ve tekstürel değerleri diğer örneklerle göre daha yüksek belirlenmiştir. Ayrıca depolama süresince toplam serbest aminoasit miktarı en fazla enkapsüle enzim içeren peynir örneğinde, daha sonra serbest enzim içeren örneklerde tespit edilmiştir. Bu da aminopeptidaz enziminin olgunlaşmayı hızlandırdığını, ayrıca enzimin enkapsüle edilmesi de proteoliz etkinliğini arttırdığını göstermiştir [6].

Peynir olgunlaşması her peynir çeşidine has tat, aroma ve yapıya neden olan bir dizi kompleks kimyasal ve biyokimyasal olayları içermektedir. Peynirin olgunlaşmasında, peynir mayası, sütün doğal enzimleri, starter bakteriler ve enzimleri ve starter olmayan bakteriler rol oynamaktadır. Olgunlaşma prosesi, glikoliz (peynirde kalan laktozun ve onun bileşenleri olan glikoz ve galaktozun fermentasyonu), lipoliz ve proteoliz olmak üzere üç farklı biyokimyasal olay içermektedir. Geleneksel peynir olgunlaştırması yavaş yavaş gerçekleşen kompleks biyokimyasal olayı içermektedir. Çoğu peynir türü çabuk olgulaşsa da, Cheddar gibi özel peynirler tat, yapı, aroma ve tekstürün gelişmesi için uzun sürede olgunlaştırılırlar. Olgunlaşma sıcaklığını yükseltmek, modifiye kültürlerin kullanılması ya da yardımcı kültürlerin kullanılması gibi yöntemler peynir olgunlaşmasını hızlandırır da ekzojen enzimlerin eklenmesi en spesifik olanıdır. Peynir yapımında süte doğrudan enzim eklenmesi istenmez, çünkü bu durum peyniraltı suyunda enzim kayıplarına, verim azalmasına ve peynir kalitesinde düşmeye neden olur. Enkapsüle edilmiş enzimlerin eklenmesi ise doğrudan enzim eklenmesinden kaynaklanan problemleri azaltır, hızlı ve aşırı proteolizi de önler. Mikrokapsüllerdeki tutuklanmış enzimler sütün içinde substratından fiziksel olarak ayrılır ve pıhtı yapım aşamasında serumdaki enzim sadece kapsülün parçalanmasıyla serbest hale geçer ve olgunlaştırma işlemini gerçekleştirir [11].

### **Dondurma ve Dondurulmuş Ürünlerde Mikroenkapsülasyon**

Süt teknolojisinde önemli bir yeri bulunan laktik asit bakterilerinin çok sayıda süt ürününün proses aşamasında yer aldığı bildirilmektedir. Bununla birlikte ince bağırsak sisteminde yaşayan laktik asit bakterilerinin metabolizmanın işlevi sırasında da sağlık açısından çok önemli bazı yararlar sağladığı belirtilmektedir. Bu derece önemli olan bu kültür bakterilerinin sayılarının dondurma ve dondurulmuş süt ürünlerinin üretimi sırasında önemli düzeyde azalma gösterdiği tespit edilmiştir.

Dondurma ve dondurulmuş ürünlerde üretim sırasında laktik asit bakterileri üzerinde gözlenen bu olumsuz etkileri ortadan kaldırabilmek amacıyla söz konusu bakterileri stabil hale getirebilmek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en önemlisi basit ve ucuz bir yöntem olan kalsiyum alginat jel içerisinde laktobasillerin tutuklanarak enkapsüle edilmesidir. Söz konusu yöntemde, kaplama materyali olarak alginatlar kullanılmakta ve bu alginatların toksik

etki göstermeyip gıdalarda hareketsiz konumdan hareketli konuma geçebilen materyaller olduğu ifade edilmektedir. Alginat jel, serbest Ca<sup>++</sup> iyonları tarafından çözülebilmekte ve bu şekilde mikrobiyal hücreler serbest kalabilmektedir. Bu enkapsülasyon tekniği bakterilerin dondurma ve dondurularak depolama işlemi sırasında serbest bakteri hücrelerinden daha fazla yaşamaları ve aktivite göstermelerini sağlamak amacıyla oldukça büyük önem taşımaktadır [1].

Bu konuda yapılan bir çalışmada mikroenkapsülasyonun dondurma içerisine ilave edilen iki probiyotik bakteri (*Lactobacillus casei* (Lc-01) ve *Bifidobacterium lactis* (Bb-12)) üzerine etkileri araştırılmıştır. Mikroenkapsüle edilmeyen probiyotik bakteri içeren ürün 180 gün, -20°C'de muhafaza edilmiş ve probiyotiklerin canlı kalma miktarları izlenmiştir. Bu oran 1. günde 5.1x10<sup>9</sup> ve 4.1 x10<sup>9</sup> kob/mL iken 180 gün sonunda 4.2x10<sup>6</sup> ve 1.1 x10<sup>7</sup> kob/mL olduğu tespit edilmiştir. Probiyotik bakteriler kalsiyum alginat ile mikroenkapsüle edildikten sonra yine aynı muhafaza sıcaklığı ve süresi baz alınarak bakteri canlılıkları izlenmiş ve bir önceki değerlerin %30 üzerinde canlı bakteri sayılmıştır. Böylece mikroenkapsülasyon ile dondurmadaki canlı probiyotik bakterilerin sayısı artırılabilir.

Sheu ve ark. [12] tarafından yapılan bir çalışmada sodyum alginat ile kapsüllenen *Lactobacillus bulgaricus* bakterilerinin dondurulmuş sütlü tatlılarda canlı hücre sayıları araştırılmıştır. Bulgulara göre enkapsüle edilen hücreler ile edilmeyen hücrelerin hayatta kalma oranları sırası ile %90 ve %40 olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda çapı 30 µ'dan büyük olan hücrelerin ortalama 15 µ olanlara göre daha fazla canlı kaldıkları belirlenmiştir [6].

### **Süt Yağının Mikroenkapsülasyonu**

Süt yağının süt ve ürünlerinin organoleptik özellikleri üzerinde önemli ölçüde etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Alçak molekülülü yağ asitlerinin trigliseridleri ile birlikte süt bileşiminde bulunan laktozun, sütün aromasına katkıda bulunduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, süt ve süt ürünlerinin organoleptik özelliklerinde çok önemli bir payı bulunan süt yağının insan beslenmesinde de önemli görevleri vardır. Bu nedenlerle dolayı, süt bileşenleri arasında çok hassas bir madde özelliği gösteren süt yağının, mikroenkapsülasyon tekniği ile dayanıklılığının artırılması ve dolayısıyla raf ömrünün uzatılması çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiştir [1].

Yağ kapsüle edilirken kaplama materyali emülsifiye edici ve dehidrasyon yeteneğine sahip olmalıdır. Sodyum kazeinat ve serum protein konsantrasyonları bu özellikleri son derece iyi olarak karşılarlar. Sodyum kazeinat daha tekdüze bir bileşime sahipken ticari serum protein konsantratları %35-75 kadar daha çok protein içerir ve serum proteini izolatlarının en azından %90'ı proteindir [13].

Young ve ark. [14] süt yağının peynir altı suyu protein konsantrasi ve izolatu ile püskürtmeli kurutma yöntemi kullanarak mikroenkapsülasyonu üzerinde çalışmışlardır. Mikroenkapsülasyonda yararlanılan ajan tipi ve konsantrasyonu (%10 ve 30 g/g) ile yağ oranlarını (% 25 ve 75 g/g) mikroenkapsülasyon verimi ve etkinliği üzerine etkilerini araştırmışlardır. Enkapsülasyon veriminin tüm sistemler için %90'dan fazla olduğu belirlenmiştir [6].

Tereyağında da mikroenkapsülasyon alternatif bir yöntem olarak düşünülebilir. Kaplama materyalinde karbonhidratların varlığı mikroenkapsülasyonun verimliliği ve etkinliğini artırır. Kaplama materyali olarak çok sayıda serum proteini ve karbonhidratlar ile çalışılmıştır. Bazı raporlara göre karbonhidratların kaplama maddesi olarak kullanılması merkezden yağ ekstraksiyonunu sınırlayan hidrofilik yapıyı sağlar. Ancak, bazı koşullarda tereyağı susuz süt yağından daha ilginç bir kaynak olabilir. Çünkü tereyağında mikroenkapsülasyonla hem süt yağı hem de tereyağı aromasının bir kısmı enkapsüle edilmiş olur.

Çalışmalar sonucunda peyniraltı suyu proteinleri ve maltodekstrin ile yapılan kaplama ticari tereyağı için etkili bir mikroenkapsülasyon sistemidir. Tozlar püskürtmeli kurutucudan kolaylıkla ayrılabilmiştir ve yüksek yağ konsantrasyonunda bile hiçbir yapışma olmamıştır. Maltodekstrin konsantrasyonun %20'ye kadar çıkması mikroenkapsülasyon etkinliğini artırır. Konsantrasyonun %15-20 arası olması mükemmel sonuçlar vermiştir [15].

### C Vitamini ve Demir

Sağlıklı bir diyet ve çeşitli gıdalar tüketmek insan vücudu için yeterli düzeyde C vitamini sağlar. Stabil C vitamini gıdaların zenginleştirilmesi için uygun bir bileşendir. Mikroenkapsülasyon C vitamini stabilizasyonunda yararlı olabilmektedir. Bu vitaminden en yüksek oranda yararlanabilmek ve gıdaların zenginleştirilmesinde kullanılabilmesi için birçok çalışma yapılmıştır.

Mikroenkapsüle edilmiş vitaminler gıdaların besleyiciliğini arttırmak amacıyla zenginleştirmede kullanılabilir. C vitamini stabilitesinin artırılmasıyla bu vitamin ekmeklerde, bebek mamalarında, tahıl barlarda ve süt ürünlerinde rahatlıkla kullanılabilir.

Uddin ve ark. [16] çeşitli işlemlerin askorbik asidin özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Termal faz ayrılması, melt dispersiyon, solvent evaporasyon ve püskürtme kurutma olmak üzere 4 farklı enkapsülasyon tekniği seçmişlerdir. Termal faz ayrılmasında kaplama materyali olarak etil selüloz kullanılmıştır. Sadece moleküler ağırlığı değiştirilmiştir; diğer bütün parametreler sabit tutulmuştur. Çalışmanın sonucunda molekül ağırlığı arttıkça enkapsüle edilecek partikül boyutunun azaldığı görülmüştür. Bu durum etil selülozun molekül ağırlığının artmasıyla mikrokapsüllerin agregasyonunun azalmasıyla açıklanabilir. Carnauba mumu da melt dispersiyonda kullanılmıştır. Sonuçlar küresel mikrokapsüllerin

boyutlarının yaklaşık 50 µm olduğunu göstermiştir. Sızma oranının faz seperasyonundaki etil selülozdan daha yavaş ve daha düşük oranda olduğu görülmüştür. Bu durumdan carnauba mumunun askorbik asidi daha stabil tuttuğu anlaşılmaktadır. Mikroenkapsüle edilen askorbik asit renk değişimlerinden de korunmaktadır. Ayrıca nişasta ve β-siklodekstrinin 38 °C ve %84 bağıl nemde tutulan askorbik asitte degradasyonun geciktiği de görülmüştür [9].

Sütün demir içeriği çok düşüktür. Son araştırmalara göre demir eksikliği anemisi yetersiz demir alımından kaynaklanan, ergenlik çağındaki gençlerde ve menstrüel dönemdeki kadınlarda çok sıklıkla rastlanan bir durumdur. Kwak ve ark. yaptığı bir çalışmada [17] demir bileşenlerinin mikroenkapsülasyonunda kaplama materyali olarak poligliserol monostearat (PGMS) kullanılmıştır. Mikrokapsüllerin boyutları 2-5 µm arasındadır. Bütün örneklerde depolama süresince demir kaybı olmuştur. Daha yüksek sıcaklıklarda (20 °C) düşük sıcaklıklara göre (4 °C) daha fazla demir mikrokapsüllerden ayrılmıştır.

Demirin lipid oksidasyonunu katalizlediği ve böylece istenmeyen tat ve koku oluşumundan dolayı da acılaşıma yol açtığı bilinmektedir. Süt ve ürünlerinin zenginleştirilmesi için demirin mikroenkapsülasyonunun düşünülmesinin en önemli nedeni sütteki lipid prooksidasyonundan kaynaklanan istenmeyen okside tat oluşumu olasılığıdır [17].

### PROBİYOTİK GIDA ÜRETİMİNDE MİKROENKAPSÜLASYON

Peynir, yoğurt ve krema gibi fermente süt ürünlerinin üretiminde bilindiği gibi laktik asit bakterileri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [18-21]. Fermente ürünlerde üretimin temeli organik asit oluşumu sonucundaki asitlik gelişimine dayanmaktadır. Laktozun laktik kültürler tarafından yıkımı sonucunda sindirilebilirliği gelişmekte ve laktik asit bakterilerinin çeşitli metabolik ve enzimatik aktiviteleri sonucu uçucu aroma maddeleri üretilmektedir. Bu da fermente süt ürünlerinde tat, aroma ve yapının gelişmesini sağlamaktadır. Probiyotikler sağlığa yararlı mikroorganizmalardır. Laktik asit bakterileri ve özellikle laktobasil ve bifidobakter cinsleri probiyotik süt ürünleri üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Laktik asit bakterilerinin immobilizasyonunda değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu tekniklerin amacı ya hücreyi yüksek konsantrasyonda biyoreaktörün içinde tutmak ya da hücreleri çevrenin olumsuz etkilerinden korumaktır. Gıda endüstrisinde mikroenkapsülasyonda kullanılacak, taşıyıcı materyal toksik olmamalı, kolay bulunabilmeli ve maliyeti yüksek olmamalıdır. Ayrıca yüksek hücre yükünü kaldırabilmeli ve canlı kalma süresini uzatabilmelidir. Gıda uygulamalarında en yaygın şekilde kullanılan immobilizasyon tekniği gıda saflığındaki polimerik matriks içerisinde hücre tutuklama yöntemidir. Birçok uygulamada polimer damlacıkları ekstrüzyon veya emülsiyon teknikleri kullanılarak üretilmektedir. Damlacıkların katlaşması sonucunda, küre şeklinde biyokatalistler meydana gelmektedir. Bu polimerler kolay temin edilebilen, gıda ve süt endüstrisinde geniş bir



şekilde kabul görmüş katkı maddeleridir. Bununla birlikte gıda sektöründe immobilize hücrelerin endüstriyel üretimlere yaygınlaşması için aseptik şartlarda ve büyük ölçekte mikrokapsül üretiminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [22]. Gıda endüstrisinde çok çeşitli mikrokapsülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerde fonksiyonel gıdaların üretimi ve geliştirilmesi için umut vermektedir. Ayrıca bu teknolojiler biyoaktif bileşenlerin başarılı bir şekilde sindirim sistemine taşınmasını da teşvik etmektedir [23].

Probiyotik mikroorganizmaların üretim ve tüketim sırasında proses koşullarına ve sindirim sisteminin zor şartlarına karşı canlı kalma sürelerinin artırılmasında mikrokapsülasyon tekniği son yıllarda üzerinde durulan bir yöntem haline gelmiştir.

Probiyotikler, yeterli sayıda alındıklarında konakçı sağlığı üzerinde olumlu etkiler gösteren canlı mikroorganizmalardır. Probiyotikler genellikle fermente süt ürünleri başta olmak üzere diğer fermente gıdalara katılarak fonksiyonel özellik kazandırmak amacıyla kullanılmakta, ayrıca tablet, kapsül veya toz formunda üretilen diyet destekleyici gıdaların bileşimine katılmaktadır. Probiyotik gıda üretimini kısıtlayan en önemli etken, kullanılan mikroorganizmaların stabilitesini, yani canlılığını koruyamamasıdır. Son yıllarda yapılan bazı araştırmalarda mikrokapsülasyon tekniğinin probiyotiklerin teknolojik özelliklerinin ve canlı kalma sürelerinin artırılmasında kullanılan yeni yöntemlerden biri olduğu bildirilmiştir. Bu tekniğin temel prensibi, probiyotik bakteri hücrelerinin bir jel içerisinde hapsedilmesi ve bu jel yapısının ince bağırsakta çözünerek bakterinin zarar görmeden bağırsak ortamında koloni oluşturma esasına dayanmaktadır.

Bu yöntemde aktif mikroorganizma çevresinde çeşitli maddelerle koruyucu bir film veya kaplama tabakası oluşturulmaktadır. Bu teknik immobilize kültür teknolojilerinden hareketle geliştirilmiştir. Mikroorganizma kaplamada püskürterek kurutma, ekstrüzyon ve emülsiyon gibi çeşitli yöntemler birlikte veya ayrı ayrı kullanılabilir. Kalsiyum-aljinat jel kapsülü oluşumu esasına dayalı bir işlem günümüzde en çok araştırılan mikrokapsülasyon tekniğidir. Bunun dışında jelatin, pektin, nişasta, kapa-karreganan, gellan gam, aljinat, peyniraltı suyu gibi gıdaların bileşiminde güvenle kullanılan maddeler de kaplama materyali olarak kullanılabilir. Mikrokapsülasyon tekniği ile kaplanan mikroorganizmalar 200µm-2000 µm çaplı partiküller içerisinde canlılıklarını koruyabilmektedir.

Gıda üretiminde kullanılacak probiyotik mikroorganizmalar genellikle dondurulmuş veya kurutulmuş olarak (dondurarak kurutma veya püskürterek kurutma) toz formunda üretilip dağıtılmaktadır. Ancak probiyotik laktik asit bakterilerinin birçoğunun püskürterek kurutma işleminde, sıcaklık ve ozmotik basıncın etkisiyle canlılığını önemli oranda kaybettiği bilinmektedir [24].

Probiyotik gıda üretiminde yaygın olarak kullanılan bakteriler *Lactobacillus spp.* (*Lb. acidophilus*) ve *Bifidobacterium spp.* (*B. bifidum*) türleridir. Probiyotik

mikroorganizmaların beklenen faydalı etkiyi sağlayabilmeleri için  $10^8$  kob/ml veya daha fazla sayıda vücuda alınmaları ve içinde buldukları gıdaları üretimi ve raf ömrü süresince canlı kalabilmeleri gerekmektedir.

Kapsülleme yolu ile koruma altına alınan bakterilerin yoğurtta canlılıklarını koruma oranı %80-95 arasında değişmektedir. Kapsülleme işlemi sırasında bakteri hücreleri fazla zarar görmemekte ve enzimatik faaliyetler engellenmemektedir. Son yıllarda probiyotik bakteriler ile prebiyotik maddelerin birlikte kapsül formunda immobilizasyona tabi tutulmasının probiyotik hücrelerin çevresel etmenlere karşı direncini daha fazla artırdığı belirlenmiştir [6].

Kültürleri kapsüllemek ve konsantre toz formuna dönüştürmek için püskürterek kurutma, dondurarak kurutma, akışkan yatak kurutma gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Ancak, bu tekniklerle kapsüllenen bakteriler üründe tamamen açılmaktadır. Bu durumda kültürler ürün ortamından, mide veya barsak sisteminden geçerken korunamamaktadır. Mikrokapsülasyon çalışmalarında en yaygın trend aljinat, κ-karragennan, kitosan, ksantan gum, gellan gum gibi uygun polimerler kullanılarak yapılan tutuklama işlemidir. Krasaekoopt ve ark. [22] hidrokoloid damlacıklar içinde enkapsülasyonun, damla matrisi içindeki hücreleri immobilize ettiğini ve sonuç olarak böyle bir ortamda korunmanın sağlandığını belirtmektedir.

Sultana ve ark. [25] yaptıkları çalışmada kalsiyum aljinat-mısır nişastası karışımı ile kaplanmış *L. acidophilus* ve *B. bifidum* kültürlerinin yapay gastrointestinal sistemdeki ve yoğurttaki canlılık düzeylerini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda mısır nişastası kullanımının kaplamada bakterilerin canlılığını nişasta kullanılmadan kaplananlara kıyasla artırdığını tespit etmişler ancak; kaplama işleminin yüksek asit ve safra tuzu ortamında bakterilerin canlılıklarının artmasında önemli bir etkisinin olmadığını belirlemişlerdir. Araştırmada ayrıca kaplanmış bakterilerin 8 haftalık depolama sonunda canlılıklarını 0,5 log birimi kaybederken, serbest hücrelerin sayısında 1 log birimi azalma olduğu tespit edilmiştir.

Guerin ve ark. [26] tarafından yapılan bir çalışmada *Bifidobacterium bifidum* aljinat, pektin ve peyniraltı suyu jeli ile kaplanmıştır. Laboratuvar koşullarında yapılan deneme sonuçlarına göre kaplama işlemi uygulanmayan hücreler canlılıklarını kaybederken kaplama işlemi uygulananlar pH 2,5'te 2 saate kadar canlılıklarını koruyabilmişlerdir.

Chen ve ark. [27] probiyotiklerin mikrokapsülasyonunda gastrointestinal koşullara dayanıklılıkları açısından kullanılacak olan mikrokapsülasyon materyallerinin en uygun kombinasyonunu saptamak amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda en uygun kombinasyonun %1 peptid ve %3 fruktooligosakkarit ile karıştırılmış olan %3'lük sodyum aljinat olduğunu bulmuşlardır.

Mandal ve ark. [28] mikroenkapsüle edilmiş *Lactobacillus casei* NCDC-298 türünün canlılığı üzerine farklı aljinat konsantrasyonlarının (%2, %3 ve %4) etkisini incelemişlerdir. Aljinat konsantrasyonu arttıkça bakterinin gastrointestinal koşullara dayanımının arttığı ve canlılık üzerinde olumlu etkisi olduğu saptanmıştır.

Heidebach ve ark. [29] *Lactobacillus paracasei ssp.paracasei* F19 ve *Bifidobacterium lactis* Bb12 probiyotik bakterileri rennet ile enkapsüle etmişlerdir. İnkübasyondan 90 dakika sonra pH 2,5 civarlarında enkapsüle edilen probiyotik hücrelerin sayılarının kapsüllenmeyen hücrelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir [6].

Mikroenkapsülasyonun, kaşar peynirinin olgunlaşması süresince *L. acidophilus* ve *B. bifidum*'un canlılığına etkisinin incelenmesi üzerine yapılan bir çalışmada; ekstrüzyon ve emülsiyon teknikleri ile kaplanan *L. acidophilus* ve *B. bifidum* kaşar peynirine ilave edilmiş ve 90 gün boyunca kaşar peynirinin mikrobiyolojik, biyokimyasal ve duyuşsal özellikleri incelenmiştir. Depolama sonucunda probiyotik hücrelerin canlılığının mikroenkapsülasyon sayesinde büyük çapta korunduğu gözlenmiştir. Haşlama işlemi sonunda kontrol grubu peynirdeki kaplanmamış probiyotik bakteri sayısı sürekli bir şekilde azalırken, kaplanmış probiyotik bakteri sayısı minimum probiyotik etkinin görüldüğü eşik değeri üzerinde kalmıştır [30].

*L. acidophilus* KPb4b ve *L. rhamnosus* KPb7 suşları elektrostatik titrim/damlatma yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama materyali olarak %1,5 aljinat, % 1,5 manukol ve %1,5 aljinat+%0,5 nişasta kullanılmış; kapsüller ve serbest probiyotik kültürlerinin; mikroenkapsülasyon verimi, salınımı, oksijen toksisitesi, düşük pH direnci, yapay mide ve bağırsak ortamlarındaki dayanımı, sıcaklık toleransı belirlenmiş ve elektron mikroskopu ile morfolojik yapıları incelenmiştir. Araştırmada ayrıca serbest ve kaplanmış kültürlerin +24°C, +5°C ve -18°C'deki depolama stabilitesi araştırılmış ve kaplanmış ya da serbest hücrelerin model gıda ortamında kullanıldığında gıdanın duyuşsal özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre elde edilen kapsüllerin boyutlarının 370 µm-404 µm arasında olduğu; mikroenkapsülasyon veriminin en yüksek %1,5 aljinat ile yapılan kaplamadan elde edildiği, salınım testinde *L. acidophilus* KPb4b suşunun *L. rhamnosus* KPb7 suşundan daha stabil olduğu, ancak oksijen toksisitesi açısından *L. rhamnosus* KPb7 kültürünün *L. acidophilus* KPb4b'ye göre daha dirençli olduğu; gıda ortamında yapılan oksijen toksisitesi denemesinde mikroorganizmaların en iyi aljinat+nişasta mikrokapsüllerinde korunduğu; sıcaklık direnci açısından 30.dakikadan sonra her iki mikroorganizma kapsüllerinin de canlılığını hızla yitirmeye başladığı belirlenmiştir. Ayrıca +5°C'de depolanan aljinat+nişasta kapsüllerinin bakteri canlılığını korumada en uygun sıcaklık ve kaplama materyali olduğu belirlenmiştir. Kaplama işleminin yapay mide ortamında mikroorganizmanın canlılığını korumada çok fazla etkili olmadığı, ancak aljinat+nişasta kapsüllerinin bakteri canlılığını korumada diğerlerine göre daha başarılı olduğu, ince bağırsak ortamında ise aljinat ve aljinat

+nişasta kapsüllerinin her iki bakteri kültürü için de en iyi korumayı sağladığı tespit edilmiştir [31].

## SONUÇ

Uzun yıllardan beri birçok alanda geniş bir uygulama alanı bulmuş olan ancak gıda endüstrisinde fazla bir kullanım alanı bulamayan enkapsülasyon teknikleri, son yıllarda gıda endüstrisinde de geniş alanlarda kullanılmaya başlanmış ve bu kullanımda son yıllarda geliştirilen gıda formülasyonlarının payının büyük olduğu bildirilmiştir. Enkapsülasyon ile lipidler, vitaminler, peptidler, yağ asitleri, antioksidanlar, mineraller ve probiyotikler gibi aktif bileşikler koruyucu bir materyalle koruma altına alır ve böylece birçok avantaj sağlar.

Günümüzde süt endüstrisinde özellikle de peynir teknolojisinde gerçekleştirilen uygulamalarda büyük başarılar elde edilmiştir. Bu başarılar arasında peynirlerin hızlı olgunlaştırılması sonucunda daha ekonomik ve daha verimli ürün eldesi söz konusu olmuştur. Buna bağlı olarak süt endüstrisinde dondurma ve dondurulmuş ürünlerin üretiminde de daha geniş spektrumlu tat ve aroma eldesi sağlanmıştır. Mikroenkapsülasyon tekniğinin uygulanmasının ekonomik fizibilitesinin de sınırlı olduğu ve büyük yatırımlar gerektirmediği bildirilmektedir.

Elde edilen tüm bu başarıların sonucunda, tüketiciye daha besleyici, güvenilir, raf ömrü uzun olan ürünler sunabilmek mümkün olmuştur. Mikroenkapsülasyon tekniğinin gıda endüstrisinde gelecek için büyük bir potansiyel oluşturduğu düşünülmekte ve ülkemizde de bu gelişmelerin elde edilmesi ve daha geniş kapsamlı araştırmaların yapılması gerekmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmaların iki veya daha fazla biyoaktif bileşenin kombine bir şekilde koenkapsülasyonu ile özellikle sinerjik etki sağlamalarına yönelik araştırmalara yönelim olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Kınık, Ö., Kavas, G., Yılmaz, E., 2003. Mikroenkapsülasyon Tekniği ve Süt Teknolojisindeki Kullanım Olanakları. *Gıda* 28(4): 401-407.
- [2] Ünal E., Erginkaya Z., 2010. Probiyotik mikroorganizmaların mikroenkapsülasyonu. *Gıda* 35(4): 297-304.
- [3] Aloğlu, H., Öner, Z., 2010. Peyniraltı suyu proteinlerinin mikroenkapsülasyon teknolojisinde kaplama materyali olarak kullanım olanakları. *Akademik Gıda* 8(3): 38-42.
- [4] 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.
- [5] Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., Saurel, R., 2007. Applications of spray-drying in microencapsulation of foods ingredients: An overview. *Food Research International* 40: 1107-1121.

- [6] Peker, H., Arslan, S., 2011. Mikroenkapsülasyon ve süt teknolojisinde kullanım alanları. *Akademik Gıda* 9(6): 70-80.
- [7] Gouin, S., 2004. Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in Food Science & Technology* 15: 330-347.
- [8] Harz, H.P., Heinzl, W., Schoner, F.J., Betz, R., Keszler, T., 2000. Method for producing feed granulates containing enzymes. *PCT WO 2000036927 A1*.
- [9] Wilson N., Shah N.P., 2007. Microencapsulation of vitamins. *ASEAN Food Journal* 14(1): 1-14.
- [10] de Vos, P., Faas, M., Spasojevic, M., Sikkema, J., 2010. Encapsulation for preservation of functionally and targeted delivery of bioactive food components. *International Dairy Journal* 20: 292-302.
- [11] Anjani, K., Kailasapathy, K., Philips, M., 2007. Microencapsulation of enzymes for potential application in acceleration of cheese ripening. *International Dairy Journal* 17: 79-86.
- [12] Sheu, T.Y., Marshall, R.T., Heymann, H., 1993. Improving survival of culture bacteria in frozen desserts by microentrap. *Journal of Dairy Science* 76: 1902-1907.
- [13] Keogh, M., O'Kennedy, B., 1999. Milk fat microencapsulation using whey proteins. *International Dairy Journal* 9: 657-663.
- [14] Young, S.L., Sadra, X., Rosenberg, M., 1993. Microencapsulating properties of whey proteins. 1. Microencapsulation of anhydrous milk fat. *Journal of Dairy Science* 76(10): 2868-2877.
- [15] Pauletti M.S., Amestoy, P., 1999. Butter microencapsulation as affected by composition of wall material and fat. *Journal of Food Science* 64(2): 279-282.
- [16] Uddin, M.S., Hawlader, M.N.A., Zhu, H.J., 2001. Microencapsulation of ascorbic acid: effect of process variables on product characteristics. *Journal of Microencapsulation* 18 (2): 199-209.
- [17] Kwak H.S., Yang K.M., Ahn J., 2003. Microencapsulated iron form ilk fortification. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 7770-7774.
- [18] Donkor, O.N., Nilmini, S.L.I., Stolic, P., Vasiljevic, T., Shah, N.P. 2007. Survival and activity of selected probiotic organisms in set-type yoghurt during cold storage. *International Dairy Journal* 17: 657-665.
- [19] Plessas, S., Trantallidi, M., Bekatorou, A., Kanellaki, M., Nigam, P. and Koutinas, A.A., 2007. Immobilization of kefir and *Lactobacillus casei* on brewery spent grains for use in sourdough wheat bread making, *Food Chemistry* 105: 187-194.
- [20] Cardarelli, H.R., Buriti, F.C.A., Castro, I.A., Saad, S.M.I., 2008. Inulin and oligofructose improve sensory quality and increase the probiotic viable count in potentially synbiotic petit-suisse cheese. *LWT - Food Science and Technology* 41: 1037-1046.
- [21] Sendra, E., Fayos, P., Lario, Y., Lopez, J.F., Barbera, E.S., Alvarez, J.A.P., 2008. Incorporation of citrus fibers in fermented milk containing probiotic bacteria. *Food Microbiology* 25: 13-21.
- [22] Krasaekoopt, W., Bhandari, B., Deeth, H.C., 2006. Survival of probiotics encapsulated in chitosan-coated alginate beads in yoghurt from UHT and conventionally treated milk during storage. *LWT - Food Science and Technology*, 39:177-183.
- [23] Champagne, C.P., Fustier, P., 2007. Microencapsulation for the improved delivery of bioactive compounds into foods. *Current Opinion in Biotechnology* 18: 184-190.
- [24] Çakır, İ., 2006. Mikroenkapsülasyon tekniğinin probiyotik gıda üretiminde kullanımı. *Türkiye 9. Gıda Kongresi*, 24-26 Mayıs 2006, Bolu.
- [25] 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: 47-55
- [26] Guerin, D., Vuilleumard, J. C., Subirade M., 2003. Protection of bifidobacteria encapsulated in polysaccharide-protein gel beads against gastric juice and bile. *Journal of Food Protection* 66: 2076-2084.
- [27] Chen, K.N., Chen, M.J., Lin, C.W., 2006. Optimal combination of the encapsulating materials for probiotic microcapsules and its experimental verification (R1). *Journal Food Engineering* 76: 313-320.
- [28] Mandal, S., Puniya A.K., Singh, K., 2006. Effect of alginate concentrations on survival of microencapsulated *Lactobacillus casei* NCDC-298. *International Dairy Journal* 16: 1190-1195.
- [29] Heidebach, T., Först, P., Kulozik, U., 2009. Microencapsulation of probiotic cells by means of rennet-gelation of milk proteins. *Food Hydrocolloids* 23: 1670-1677.
- [30] Özer, B., Kirmacı, H.A., Senel, E., Atamer, M., Hayaloglu, A., 2009. Improving the viability of *Bifidobacterium bifidum* BB-12 and *Lactobacillus acidophilus* LA-5 in white-brined cheese by microencapsulation. *International Dairy Journal* 19: 22-29.
- [31] İşleyen, M.F., 2010. Mikroenkapsülasyon Tekniğinin *Lactobacillus acidophilus* KPb4b ve *Lactobacillus rhamnosus* KPb7 Probiyotik Kültürlerinin Stabilitesi Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Bolu.