

BİYOAKTİF BİLEŞİKLERİN ENKAPSÜLASYONU VE ET VE ET ÜRÜNLERİNDE UYGULAMALARI

Tuba NURİLER^{1*}, Aytunga BAĞDATLI¹

Accepted: 2024-07-17
DOI: 10.47118/somatbd.1500219

ÖZET

Enkapsülasyon teknolojisi gıda ürünlerindeki temel bileşenlerin kararlılığını, spesifikliğini ve biyoyararlanımını iyileştirmek amacıyla ortaya çıkmıştır. Ayrıca, enkapsülasyon teknolojisi, biyoaktif bileşiklerin termal ve oksidatif kararlılıklarını artırmak, kontrollü salınımını gerçekleştirmek ve baskın koku ve tadını maskelemek amacıyla uygulama alanı bulan değerli yöntemlerden biridir. Bu teknoloji diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, çekirdek malzemeyi dış ortamdan izole edebilmekte ve istenmeyen bileşenlerin oluşumunu engellemeye yardımcı olabilmektedir. Bu sebeplerle, enkapsülasyon teknolojisi gıdaların raf ömrünü uzatmaya, besin değerini yükseltmeye, çeşitliliğini arttırmaya ve daha sağlıklı gıdalar elde etmeye imkan sağlamaktadır. Bu derleme, et ve et ürünlerinin muhafazasında karşılaşılan zorluklara odaklanarak enkapsüle biyoaktif bileşiklerin et ve et ürünlerine ilave edilmesi, ürünün organoleptik özellikleri üzerindeki etkileri ve raf ömrü süresince meydana gelen fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik değişimleri hakkında değerli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: enkapsülasyon, biyoaktif bileşikler, antioksidan, antimikrobiyal.

ABSTRACT

Encapsulation technology has emerged to improve the stability, specificity and bioavailability of basic components in food products. In addition, encapsulation technology is one of the valuable methods that find application in order to increase the thermal and oxidative stability of bioactive compounds, to perform controlled release and to mask the dominant odor and taste. Compared to other methods, this technology can isolate the core material from the external environment and help to prevent unwanted components. For these reasons, encapsulation technology allows to extend the shelf life of foods, increase their nutritional value, increase their variety and obtain healthier foods. This review focuses on the difficulties encountered in the preservation of meat and meat products and provides valuable information about the addition of encapsulated bioactive compounds to meat and meat products, their effects on the organoleptic properties of the product and the physical, chemical and microbiological changes that occur during the shelf life.

Key words: encapsulation, bioactive compounds, antioxidant, antimicrobial.

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa/TÜRKİYE
* htuba93@gmail.com

1. GİRİŞ

Et ve et ürünleri, işleme, pişirme ve muhafaza edilmesi sırasında meydana gelen mikrobiyolojik bozulmalara ve lipit ve protein oksidasyonuna karşı oldukça duyarlıdır. Bu durum, gıdanın besin değerinin, aromasının ve dokusunun bozulmasına ayrıca raf ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Et ve et ürünlerinin kalitesini korumanın veya iyileştirmenin geleneksel yolu sentetik gıda katkı maddelerinin kullanılmasıdır (Zhang ve Piao, 2023). Fakat bu kimyasal koruyucuların gıda ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle tüketiciler tarafından doğal kaynaklı koruyucular talep edilmektedir (Amiri ve ark., 2021).

Son yıllarda çeşitli et ve et ürünlerine entegre edilmek üzere önemli antimikrobiyal ve antioksidan özelliklere sahip yeni ve toksik olmayan biyoaktif bileşikler araştırılmaktadır (Konfo ve ark., 2023). Bununla birlikte, doğal olarak oluşan biyoaktif bileşiklerin kimyasal olarak kararsız olduğu, oksidatif parçalanmaya duyarlı olduğu ve formülasyonlarda doğrudan kullanımının sınırlı olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, bu bileşiklerin dağıtım, depolama ve işleme koşullarına karşı yüksek hassasiyet gösterdiği ve istenmeyen bir tat oluşturması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Zhang ve ark., 2022). Bu amaçla biyoaktif bileşiklerin enkapsüle edilerek gıda matrisine ilave edilmesiyle bu dezavantajların önüne geçilebileceği belirtilmiştir (Jiang ve ark., 2024).

Enkapsülasyon teknolojisi, biyoaktif bir bileşiği bozulmasına ve biyoyararlanım kaybına neden olabilecek farklı fizikokimyasal faktörlerden (sıcaklık, oksijen, nem, pH vb.) korumak amacıyla bir duvar malzemesi içine hapseden işlem olarak tanımlanmaktadır. Bu teknoloji, ılımlı çalışma koşulları sağladığı için biyoaktif bileşiklerin enkapsüle edilmesine oldukça uygundur. Ayrıca bu teknoloji, diğer kapsülleme tekniklerine kıyasla daha yüksek enkapsüle verimliliği ve daha fazla azaltılmış parçacık boyutu sunmaktadır (Vázquez-González ve ark., 2021).

Enkapsülasyon, biyoaktif bileşikleri korumak için en etkili stratejilerden biridir. Bu stabilizasyon biçimi, püskürtmeli kurutma ve emülsifikasyon teknikleri kullanılarak farklı ölçeklerde maddelerin paketlenmesi için kullanılmaktadır. Enkapsülasyon teknolojisindeki en önemli hedef, hapsedilen bileşiğin veya bileşiklerin orijinal işlevselliğini korumak ve bunların uygun miktarda amaçlanan yere ulaşmasını sağlamaktır. Bu işlevsellik, işleme, depolama ve raf ömrü boyunca korunmalıdır (Olivares-Tenorio ve ark., 2024). Kontrollü salınım olarak belirtilen bu işlevsellik, enkapsülasyon uygulamalarında en önemli parametrelerden ve istenen karakteristik özelliklerden biridir. Salınım oranını etkileyen başlıca faktörler aktif maddenin bulunduğu matriks yapısı ve kullanılan duvar materyali ile aktif maddenin kimyasal özellikleri arasındaki ilişkidir. Çekirdekteki aktif maddenin yavaş bozulan bir matriks içerisine enkapsülasyonu, maddenin yavaş ve kontrollü salınımı için imkan sağlamaktadır (Smaoui ve ark., 2021).

Gıda endüstrisinde enkapsülasyon teknolojisinin; kontrollü ve hedefli salınım sağlayabilmesi, gıdadaki besin maddelerinin tutulma süresini iyileştirebilmesi, işleme ve depolama sırasında biyoaktif bileşiklerin stabilitesini ve kullanılabilirliğini koruyabilmesi, gıda matrisiyle istenmeyen etkileşimleri önleyebilmesi, bozulma süreçlerini yavaşlatabilmesi, istenmeyen koku veya tadı maskeleyebilmesi ve biyoaktif bileşiğin işlevselliğini koruyabilmesi gibi birçok avantajı bulunmaktadır (Zhang ve ark., 2022). Enkapsülasyon, gıdalarda özellikle raf ömrünü arttırmak, besin değerini yükseltmek, sindirilebilirliği sağlamak ve olgunlaşma süresini kısaltmak gibi birçok amaçlarla uygulanmaktadır. Son yıllarda et ve et ürünlerinde enkapsülasyon teknolojisiyle birlikte çeşitli bileşenlerin kullanılması, ürün çeşitliliğinin

artmasına ve tüketici sağlığını geliştirici ürünler elde edilmesine imkan sağlamaktadır (Kaur ve Kaur, 2021).

Et ve et ürünlerinin gıda güvenliği ve kalite parametrelerinin korunması amacıyla, çeşitli yöntemler kullanılarak biyoaktif materyaller ile muamele edilmesi çok yaygındır. Enkapsüle edilen biyoaktif materyaller çevresel şartlara daha dirençli hale gelerek uzun süre ortamda etkinliklerini koruyabilmektedir. Bu sebeplerle son yıllarda enkapsülasyon teknolojisi ile gıdaların aromasını, stabilitesini ve raf ömrünü kontrol etmek amacıyla yapılan çalışmalar ivme kazanmıştır (Soyuçok ve ark., 2019). Bu çalışmada, et ve et ürünlerinde meydana gelen bozulmaları geciktirmek veya önlemek ve ürün kalitesini korumak veya arttırmak amacıyla enkapsüle biyoaktif materyallerin kullanımına yönelik yeni çalışmalar derlenmiştir.

2. GIDA ENDÜSTRİSİNDE ENKAPSÜLASYON TEKNOLOJİSİ

Enkapsülasyon; katı, sıvı veya gaz halindeki gıda bileşenlerinin kaplanarak kapsüller içinde tutulması ve belirli hızlarda salınmasını sağlayan teknolojidir (Tutun ve Yurdakul, 2022). Kaplanan materyale çekirdek malzemesi, aktif madde, iç faz veya dolgu adı verilirken, enkapsüle etmek için kullanılan maddeye duvar malzemesi, kabuk, taşıyıcı, kapsülleyici ajan, membran veya kaplama malzemesi denilmektedir (Culas ve ark., 2024). Gıda çekirdek malzemeleri arasında esterler, eterler, ketonlar, alkoller, su, gliserin, mentol, aroma bileşenleri, pigmentler, enzimler, mineraller, vitaminler, amino asitler, yağlar, katı yağlar, çeşniler, gıda katkı maddeleri ve probiyotikler bulunmaktadır (Alu'datt ve ark., 2022). Enkapsülasyon teknolojisinde en yaygın kullanılan kaplama malzemeleri; nişasta, selüloz, alginat, pektin, karragenan ve kitosan gibi polisakkaritler, soya, peynir altı suyu, kazein, jelatin ve beta (β)-laktoglobulin gibi proteinler ve hidrojene bitkisel yağlar gibi lipidlerdir (Gökmen ve ark., 2012).

Enkapsülasyon teknolojisinin en önemli amacı aktif olarak kullanılacak çekirdek malzemelerin nanometrik, mikrometrik veya milimetrik ölçülerde kaplama materyali içinde tutulmasını sağlamaktır (Tutun ve Yurdakul, 2022). Enkapsülasyon uygulamaları kapsül boyutuna göre nanoenkapsülasyon (<0.2 μm), mikroenkapsülasyon (0.2-5,000 μm) ve makroenkapsülasyon (>5,000 μm) olarak isimlendirilmektedir (Gökmen ve ark., 2012). Bileşiklerin enkapsüle edilmesinde; püskürtmeli kurutma, dondurarak kurutma, soğutma, eriyik enjeksiyonu, ekstrüzyon, akışkan yataklı kaplama, lipozomal ve niozomal hapsetme, inklüzyon kompleksasyonu ve emülsifikasyon dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında mikroemülsiyonlar ve nanoemülsiyonlar özel avantajlara sahip yeni yaklaşımlardır (Garavand ve ark., 2021).

Enkapsülasyon teknolojisinde kullanılacak olan kaplama materyali seçimi işlemin başarısını etkileyen önemli unsur olmakla birlikte, kaplama materyali çekirdek materyalini dış etkilere karşı bariyer görevi görerek korumak, herhangi başka bir bileşenle reaksiyona girmesini engellemekle görevlidir. Bununla birlikte kaplama materyali istenilen çözgüde çözünebilmeli, çekirdek materyalini çok iyi kaplayarak hem ürünün işlenmesi hem de depolanması sırasında koruyabilme özelliğine sahip olmalıdır. Aynı zamanda istenilen koşullarda çekirdek materyalinin salınımını kolaylaştırırken, düşük maliyetli, tatsız ve temini kolay olmalıdır. Ancak bütün bu özelliklerin tek bir materyal ile sağlanması oldukça güç olduğu için farklı kaplama materyallerinin bir arada kullanılması önerilmektedir (Balci-Torun, 2019).

Gıdalarda meydana gelen bozulmalar, gıda kaynaklı hastalıklara neden olmakla birlikte gıdaların raf ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Gıda endüstrisinde geliştiren tüm

yöntemler; bozulma etmeni mikroorganizmalar, kimyasal maddeler, oksijen, nem, ışık, dış etkenler (darbe, ezilme vb.) gibi istenmeyen faktörleri veya koşulları önleyerek gıdanın raf ömrünü uzatmak ve depolama ve taşıma sırasında gıdanın kalitesini ve güvenliğini korumak için geliştirilmektedir (Zhu ve ark., 2024). Enkapsülasyon teknolojisinin gıda endüstrisinde uygulanması oldukça eskiye dayanmaktadır. Özellikle son yıllarda fonksiyonel gıdaların öneminin giderek artması sonucunda enkapsülasyon işlemi gıda sektörü için daha fazla önem kazanmıştır (Alu'datt ve ark., 2022).

3. BİYOAKTİF BİLEŞİKLER

Biyoaktif bileşikler, çeşitli yaşam olaylarında önemli roller oynayan organizmalarda eser veya küçük miktarlarda bulunan maddelerdir. Bu bileşenler arasında terpenoidler, steroller, alkaloidler, glikozitler, reçineler, bitki pigmentleri, mineral elementler, enzimler ve vitaminler bulunmaktadır (Xu ve ark., 2024). Doğal olarak türetilen antioksidan ve antimikrobiyal özellikler çay, bitkiler, baharatlar, tahıllar, ağaçlar, meyveler ve sebzeler yoluyla elde edilmektedir (Zhang ve ark., 2022). Doğal olarak oluşan bu biyoaktif moleküller, et ve et ürünlerinde oksidasyonu engelleyen veya geciktiren antioksidanlar olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca antioksidan aktiviteye ek olarak, çoğu doğal biyoaktif bileşik antimikrobiyal antikanserijen, antienflamatuvar ve antiviral özelliklere de sahip olmaktadır (Nkurunziza ve ark., 2021).

Biyoaktif bileşiklerin daha güvenli ve daha etkili olduğuna dair kanıtlar, et endüstrisini sentetik antioksidanların yerini almak üzere et sistemlerine bitki kaynaklı biyoaktif maddeler ilave etmeye yöneltmiştir. Sonuç olarak yeşil çay, sarımsak, adaçayı, üzüm, soğan, kakao, kekik, biberiye vb. gibi bazı bitkiler, GRAS (Genel Olarak Güvenli Kabul Edilir) akreditasyonu sebebiyle güvenli olarak görülmektedir. Son yıllarda çeşitli et ve et ürünlerine entegre edilmek üzere çeşitli bitkiler araştırılmaktadır (Zhang ve ark., 2022). Ancak çeşitli çalışmalarda, doğal kaynaklı biyoaktif bileşiklerin doğrudan gıda matrisine eklendiğinde, duyu özellikleri olumsuz yönde etkileyebileceği ve istenen antioksidan ve antimikrobiyal özelliklerinin depolamanın son günlerinde azaldığı belirlenmiştir. Bu sebeplerle enkapsülasyon teknolojisi, biyoaktif bileşiklerin kontrollü salınımını gerçekleştirerek olumsuz çevre şartlarında ve istenen raf ömrü boyunca antioksidan ve antimikrobiyal özellikler sergilenmesine imkan sağlayan bir yöntem olarak önerilmektedir (Rahnemoon ve ark., 2021).

Enkapsülasyon teknolojisi, biyoaktif materyalleri bir veya daha fazla duvar malzemesi yoluyla korumak için etkili bir yöntemdir. Böylelikle biyoaktif materyallerin, gıda bileşenleriyle doğrudan etkileşimi önlenebilir ve bu materyallerin biyolojik aktiviteleri artırılabilir (Zhang ve Piao, 2023). Bu amaçla biyoaktif bileşiklerin enkapsüle edilmesine dayalı yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Chen ve ark., (2020) kurkimini Xu ve ark., (2022) fenoller ve flavonoidler içeren bitki ekstraktlarını enkapsüle ederek etkilerini incelemiş ve iki çalışmada da serbest formlarından daha yüksek oksidatif kararlılık gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, tannik asit-Fe III kompleksi ile oluşturulan mikrokapsüllerin, çekirdek malzemeyi oksidasyondan daha etkili bir şekilde koruduğu belirtilmiştir (Xu ve ark., 2022).

4. ENKAPSÜLE BİYOAKTİF BİLEŞİK İÇEREN ET VE ET ÜRÜNLERİ

Gıda endüstrisinde et ve et ürünlerinin mikrobiyal bozulmaları, protein ve lipid oksidasyonlarını yavaşlatabilecek, kalitesini iyileştirebilecek ve raf ömrünü uzatabilecek doğal alternatif yollar aranmaktadır (Manassi ve ark., 2022). Geliştirilen yöntemlerdeki amaç, gıdaların daha güvenilir bir şekilde üretilmesi, besin değerini kaybetmemesi, mümkün olduğunca doğal

ve sağlıklı olmasıdır. Bu sebeple sağlıklı ve güvenli gıda üretmek amacıyla gıda endüstrisinde gıda kaynaklı patojenleri önlemek ve gıdaların bozulmasını kontrol altına almak amacıyla birçok yöntem araştırılmaktadır. Son yıllarda, et ve et ürünlerinde doğal biyoaktif bileşiklerin kullanılması ve bu bileşiklerin çeşitli yöntemlerle entegre edilmesi yönünde çalışmalar hız kazanmaktadır (Zhang ve Piao, 2023). Bu amaçla enkapsülasyon teknolojisiyle biyoaktif bileşik içeren et ve et ürünleri yönünde yapılan çalışmalar literatürde araştırılmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar irdelendiğinde enkapsülasyon teknolojisi et ve et ürünlerinde mikrobiyal gelişim, lipit oksidasyonu, duyu özellikler ve fizikokimyasal özellikler açısından değerlendirilmiştir. Surendhiran ve ark., (2020), kitosan ve etilen oksit kaplama materyallerini kullanarak nar kabuğu ekstraktını enkapsüle etmiş ve sığır etine uygulamıştır. Enkapsüle nar kabuğu ekstraktının önemli fizikomekanik, termal ve antimikrobiyal özellikler sergilediği ve ambalajlamada etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, in vitro deneyler sonucunda uygun ortamda yavaşça salınan kapsüllenmiş nar kabuğu ekstraktının *E. coli* oluşumunu büyük ölçüde inhibe ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca Najjaa ve ark., (2020), spreyle kurutma yöntemi ile *Allium sativum* esansiyel yağını (%5, %10, %15, %20) mikroenkapsüle ederek sığır eti kıymasına uygulamış antimikrobiyal etkinliğini araştırmıştır. Çalışmada mikroenkapsüle *Allium sativum* esansiyel yağ oranının artmasıyla *E. coli* gelişiminin önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir.

Sığır eti köftesinin raf ömrünü iyileştirmek amacıyla Morsy ve ark., (2019) nar kabuğu nanopartiküllerini enkapsüle ederek köftelere uygulamış ve etkisini incelemiştir. Enkapsüle nar kabuğu nanopartikülleri ile muamele edilen köftelerin raf ömrünün 15 güne kadar uzadığı ve depolama boyunca su tutma kapasitesinin ve pişirme veriminin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Hadian ve ark., (2017) enkapsüle *Rosmarinus officinalis* uçucu yağının *Salmonella Typhimurium*'a karşı antibakteriyel aktivitesini çeşitli et ürünleri için değerlendirmiştir. Çalışmada 2 mg/g lik enkapsüle *Rosmarinus officinalis* uçucu yağının kullanımıyla antimikrobiyal etki sağlanmış ve 12 günlük depolama süresine ulaşabileceği tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada, nitrit kullanımını azaltmak amacıyla Vafania ve ark., (2019), jelatin/kitosan kaplama materyali kullanarak kekik esansiyel yağını (%20- %40) enkapsüle etmiş ve sosislere uygulamıştır. Enkapsüle kekik esansiyel yağı içeren sosislerde *C. perfringens* sayılarının kontrol grubuna göre daha az sayıda geliştiği gözlemlenmiştir.

Çeşitli kaplama materyallerinin araştırıldığı bir çalışmada, Esmaceli ve ark., (2020) kitosan veya peynir altı suyu proteini kaplama materyallerini kullanarak sarımsak esansiyel yağını enkapsüle etmiş ve sosislere uygulamıştır. Kontrol ile kıyaslandığında tüm uygulama yöntemlerinin mikrobiyal gelişmeyi ve lipit oksidasyonunu geciktirdiği bildirilmiştir. En iyi sonuçlar ise kitosan kaplama materyali kullanılarak üretilen enkapsüle sarımsak esansiyel yağı uygulanan örneklerde elde edilmiştir. Ayrıca Oliveira ve ark., (2022) jelatin veya kitre zamkı kaplama materyali kullanarak zeytin yaprağının fenolik ekstraktını liyofilizasyon yöntemiyle enkapsüle etmiştir. Çalışmada enkapsüller koyun eti hamburgerine uygulanarak oksidatif bozulma açısından etkisi araştırılmıştır. Kaplama materyali olarak kitre zamkı ve jelatinin birlikte kullanıldığı enkapsüller ile diğer gruplara göre daha yüksek enkapsülasyon etkinliği ve antioksidan aktivite değerleri elde edilmiştir. Başka bir çalışmada, Snoussi ve ark., (2022) kitosan, arap zamkı ve medyan zincirli triagliseroller içeren kaplama materyaline farklı konsantrasyonlarda kekik esansiyel yağı (%0-2-2,5-3-3,5) ilave ederek nanoemülsiyonlar üretmiştir. Nanoemülsiyonlar taze sığır etine uygulanmış ve kontrol grubu ile depolama parametreleri açısından kıyaslanmıştır. Çalışmada kekik uçucu yağının %2 oranında kullanılmasıyla emülsifikasyon özelliklerinin daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, diğer

gruplar ile kıyaslandığında kontrol grubunda daha yüksek pH ve TBA değerleri elde edildiği belirlenmiştir.

Çeşitli bitkisel yağların et ürünlerine ilave edilmesiyle istenmeyen duyu kalite özellikleri gelişebilmektedir. Bu amaçla yapılan bir çalışmada Heck ve ark., (2017) yüksek n-3 PUFA seviyelerine sahip chia ve keten tohumu yağını sodyum aljinat ve CaCl₂ kaplama materyali ile enkapsüle ederek burgerlere uygulamıştır. Çalışmada, doğrudan chia ve keten tohumu yağı içeren örneklerle kıyasla bu yağların enkapsüle edilerek burgerlere uygulanmasıyla daha iyi tekstürel özellikler sağlanmıştır. Ayrıca bu yağların enkapsüle yöntemiyle et ürünlerine ilave edilmesinin tekstürü olumsuz etkilemediği için umut verici bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Sarmast ve ark., (2023) laktik asit bakterileri tarafından üretilen bakteriyosinler ve uçucu yağlar (EO) içeren çeşitli biyoaktif bileşenlerin jelatin bazlı enkapsülasyonunu gerçekleştirmiş ve köftelere uygulamıştır. Çalışmada narenciye ekstraktının, tarçın ve kekik uçucu yağların 20 ile 5000 ppm arasında patojen mikroorganizmalara karşı sinerjistik etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca enkapsülasyon uygulamasıyla biyoaktif bileşiklerin daha iyi korunduğu ve mikrobiyal gelişmeyi, lipit oksidasyonunu ve renk değişikliklerini geciktirmede etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Radünz ve ark., (2020) kekik esansiyel yağını doğrudan veya enkapsüle ederek hamburger tipi et ürünlerine uygulamış ve antioksidan ve antimikrobiyal etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada incelenen farklı mikroorganizmalara karşı enkapsüle kekik esansiyel yağının, doğrudan ilave edildiği yonteme göre daha yüksek antimikrobiyal aktivite gösterdiği ve mikrobiyal bozulmaları önemli ölçüde geciktirdiği belirtilmiştir. Başka bir çalışmada, Ghaderi-Ghahfarokhi ve ark., (2017) tarçın esansiyel yağını köftelere doğrudan veya enkapsüle ederek uygulamıştır. Çalışmada, doğrudan tarçın esansiyel yağı içeren örneklerin renk ve koku değerlerinin olumsuz etkilendiği belirtilmiştir. Ayrıca tarçın esansiyel yağının enkapsüle edilerek köftelere uygulanmasıyla mikrobiyal gelişmenin geciktirildiği ve tüketici kabul edilebilirliğinin iyileştirildiği tespit edilmiştir. Masoomian ve ark., (2023) modifiye atmosfer paketlenme (MAP) ve nanoenkapsüle narenciye ekstraktı ve kekik esansiyel yağının (%0,05-0,1-0,2) kombinasyonunu kıymaların 4 °C'de depolanmasında uygulamıştır. Sonuçlar incelendiğinde, %0,2 oranında esansiyel yağ içeren nanoenkapsüllerde, depolamanın 34. gününde esansiyel yağların %50'sinin korunarak en yüksek değere sahip olduğu bildirilmiştir. Nanoenkapsüle esansiyel yağlar ve MAP kombinasyonun, mikrobiyal gelişmeyi geciktirmede önemli bir sinerjik etkiye sahip olduğu kontrol grubuyla karşılaştırıldığında kıymanın raf ömrünü 3-4 gün uzattığı belirlenmiştir.

Tometri ve ark., (2020) lesitin kaplama materyali kullanarak *Laurus nobilis* yaprağı ekstraktını nano-lipozom yöntemiyle enkapsüle etmiş ve sığır etine uygulamıştır. *Laurus nobilis* yaprağı ekstraktının 1500 ppm oranda enkapsüle edilerek uygulanmasıyla oksidasyon sürecinin ve mikrobiyal bozulmaların geciktirildiği tespit edilmiştir. Gorzin ve ark., (2024) maltodekstrin/zamk arabik kaplama çözeltisinde *Oliveria decumbens* Vent. (OEO) ve fesleğen (BEO) esansiyel yağlarını dondurarak kurutma yöntemiyle enkapsülasyonunu gerçekleştirerek sığır kıymasına uygulamış ve duyu özellikler, antioksidan ve antibakteriyel aktiviteler açısından değerlendirmiştir. Çalışmada, hem serbest hem de enkapsüle OEO ve BEO'ların çeşitli gram pozitif ve gram negatif bakterilere karşı önemli derecede antimikrobiyal etki gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca tiyobarbiturik asit değerlerinin esansiyel yağların eklenmesiyle daha iyi korunduğu belirtilmiştir. Duyusal analizler doğrultusunda, enkapsülasyon işlemiyle çalışmada kullanılan esansiyel yağların doğal lezzet ve aromalarının etkili bir şekilde maskelendiği ve bu sayede kıyma örneklerine ilave edilmeye uygun hale geldiği sonucuna varılmıştır.

Goudarzi ve ark., (2023) akıllı ambalajlama sistemi içerisinde kullanılmak üzere enkapsüle *Prunus domestica* ekstraktı (PDE; %3) ve epigallokateşin gallat (EGCG; 5 ve 10 µg/ml) içeren k-karragenan-poli(vinil alkol) (KC-PVA) elektroegirme fiber matları üretmiştir. KC-PVA elektroegirme fiber matları, soğuk depolama sırasında çiğ kıyma etinin bozulmasını izlemek ve raf ömrü kalitesini artırmak amacıyla uygulanmıştır. Çalışmada, en düşük mikrobiyal ve kimyasal değişimler KC-PVA-EGCG 5 µg/ml-PDE 3% örneklerinde en yüksek duyuşal puanlar ise KC-PVA-EGCG 10 µg/ml-PDE 3% elektroegirme fiber matlarıyla paketlenmiş örneklerde bulunmuştur. Ayrıca çalışmanın sonunda, KC-PVA-PDE 3% elektroegirme fiber matlarıyla paketlenmiş numunelerin toplam canlı sayısı, pH ve toplam uçucu bazik azotu sırasıyla 7,21 log CFU/g, 6,63 ve 28,07 mg N/100 g'a ulaştığı ve bu grup için matların renginin beyazdan morumsu-kırmızıya değıştığı saptanmıştır. Bu sebeple enkapsüle PDE ve EGCD içeren elektroegirme fiber matlarının soğuk depolama sırasında kıyma eti için akıllı bir ambalaj malzemesi olarak kullanılabilceğı belirtilmiştir.

SONUÇ

Et ve et ürünlerinin güvenliğini ve muhafazasını iyileştirme potansiyeline sahip olan enkapsülasyon teknolojisinin geliştirilmesi ve uygulanması gelecek vadetmektedir. Son çalışmalar, enkapsüle biyoaktif bileşiklerin kararlılık, biyoaktivite ve kontrollü salınım özellikleri açısından serbest formlarından daha iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca enkapsülasyon teknolojisine, biyoaktif materyallerin duyuşal kaliteyi olumsuz etkileyen baskın koku ve tat gibi sorunları aşılmaktadır. Ancak, enkapsülasyon işleminde meydana gelen enerji tüketimi, yüksek hazırlama maliyetleri, enkapsülasyon oranındaki sınırlamalar ve hassas kontrollü salınım gibi zorluklar hala mevcuttur. Bu sorunları ele almak için, enkapsülasyon teknolojisindeki temel araştırmaları güçlendirmek çok önemlidir. Ayrıca, araştırmalarda daha yüksek bir doğruluk sağlayacağı için enkapsüle biyoaktif bileşiklerin kontrollü salınımının modellenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, çevre dostu, enerji açısından verimli ve düşük hazırlama gereksinimleri olan yeni enkapsülasyon teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanılmalıdır. Ayrıca bir diğere önemli konu ise enkapsüle biyoaktif bileşiklerin aktivitesini etkileyebilecek olan yüksek hidrostatik basınç, mikrodalga, ohmik ısıtma, ışınlama ve ultrason gibi yeni teknolojilerin araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan araştırmalar ve teknolojik gelişmelerle birlikte enkapsülasyon teknolojisinin et ve et ürünlerinin muhafazasında geleneksel bir süreç haline gelmesi beklenmektedir. Ayrıca, bu teknoloji çok yönlü uygulama alanı bularak enzim enkapsülasyonu, enkapsüle biyosensör üretimi ve kendi kendini imha gibi yeni teknolojilerin geliştirilmesine fırsat sağlayacaktır. Sonuç olarak, enkapsülasyon teknolojisinin; gıdaların işlenmesinde, gıda kalitesinin, verimliliğinin ve raf ömrünün arttırılmasında ayrıca gıdalarda meydana gelen bozulmaların tespitinde daha büyük bir rol oynayacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Amiri, S., Moghanjoughi, Z.M., Bari, M.R., Khaneghah, A.M. (2021). “Natural protective agents and their applications as bio-preservatives in the food industry: An overview of current and future applications”. *Italian Journal of Food Science.*, 33, 55-68. DOI 10.15586/ijfs.v33iSP1.2045
- Balcı-Torun, F. (2019). “Farklı enkapsülasyon yöntemleri kullanılarak elde edilen aroma kapsüllerinin depolama stabilitesinin ve gıda katkı maddesi olarak kullanımının araştırılması”. *Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Türkiye.*
- Chen, Y., Tai, K., Ma, P., Su, J., Dong, W., Gao, Y., Mao, L., Liu, J., Yuan, F. (2021). “Novel γ -cyclodextrin-metal-organic frameworks for encapsulation of curcumin with improved loading capacity, physicochemical stability and controlled release properties”. *Food Chemistry*, 347, 128978. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128978>
- Culas, M.S. Popovich, D.G. Rashidinejad, A. (2024). “Recent advances in encapsulation techniques for cinnamon bioactive compounds: A review on stability, effectiveness, and potential applications”. *Food Bioscience*, 57, 103470. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103470>
- Esmaili H., Cheraghi N., Khanjari, A., Rezaeigolestani, M., Basti, A.A., Kamkar, A., Aghae, E.M. (2020). “Incorporation of nanoencapsulated garlic essential oil into edible films: A novel approach for extending shelf life of vacuum-packed sausages”. *Meat Science*, DOI: 10.1016/j.meatsci.2020.108135
- Garavand, F., Jalai-Jivan, M., Assadpour, E., Jafari, S.M. (2021). “Encapsulation of phenolic compounds within nano/microemulsion systems: A review”. *Food Chemistry*, 1, 364, 130376. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130376.
- Ghaderi-Ghahfarokhi, M., Barzegar, M., Sahari, M.A., Gavlighi, H.A., Gardini, F. (2017). “Chitosan-cinnamon essential oil nano-formulation: Application as a novel additive for controlled release and shelf life extension of beef patties”. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 19–28.
- Gorzin, M., Saeidi, M., Javidi, S., Seow, E-K., Abedinia, A. (2024). “Nanoencapsulation of *Olivaria decumbens* Vent./basil essential oils into gum arabic/maltodextrin: Improved in vitro bioaccessibility and minced beef meat safety”. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 132288.
- Goudarzi, J., Moshtaghi, Hamdollah, Yasser, S. (2023). “Kappa-carrageenan-poly(vinyl alcohol) electrospun fiber mats encapsulated with *Prunus domestica* anthocyanins and epigallocatechin gallate to monitor the freshness and enhance the shelf-life quality of minced beef meat”. *Food Packaging and Shelf Life*, 35, 101017. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.101017>
- Gökmen, S. Palamutoğlu, R., Sariçoban, C. (2012). “Gıda Endüstrisinde Enkapsülasyon Uygulamaları”. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 36-50.

Hadian, M., Rajaei, A., Mohsenifar, A., Tabatabaei, M. (2017). "Encapsulation of Rosmarinus officinalis essential oils in chitosan-benzoic acid nanogel with enhanced antibacterial activity in beef cutlet against Salmonella typhimurium during refrigerated storage". LWT, 84, 394–401.

Heck, R.T., Vendruscolo, R.G., de Araújo Etchepare, M., Cichoski, A.J., de Menezes, C.R., Barin, J.S., Sampagnol, P.C.B. (2017). "Is it possible to produce a low-fat burger with a healthy n-6/n-3 PUFA ratio without affecting the technological and sensory properties"? Meat Science, 130, 16–25.

Jiang, G., Ramachandriah, K., Zhao, C. (2024). "Advances in the development and applications of nanofibers in meat products". Food Hydrocolloids, 146, 109210. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109210>

Kaur, R., Kaur, L. (2021). "Encapsulated natural antimicrobials: A promising way to reduce microbial growth in different food systems". Food Control, 123, 107678.

Konfo, T.R.C., Djouhou, F.M.C., Koudoro, Y.A., Dahouenon-Ahoussi, E., Avlessi, F., Sohounhloue, C.K.D., Simal-Gandara, J. (2023). "Essential oils as natural antioxidants for the control of food preservation". Food Chemistry Advances, 2, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100312>

Manassi, C.F., de Souza, S.S., Hassemer, G.S., Sartor, S., Lima, C.M.G., Miotto, M., Lindner, J.D., Rezzadori, K., Pimentel, T.C., Ramos, G.L.P.A., Esmerino, E., Duarte, M.C.K.H., Marsico, E.T., Verruck, S. (2022). "Functional meat products: Trends in pro-, pre-, syn-, para- and post-biotic use". Food Research International, 154, 111035, doi: 10.1016/j.foodres.2022.111035.

Masoomian, M., Sarmast, E., Salmieri, S., Lacroix, M. (2023). "Application of nano-encapsulated antimicrobial compounds combined with MAP for bio-preservation of ground meat". Journal of Food Measurement and Characterization, 17, 6552–6565. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02141-x>

Morsy, M. K., Mekawi, E., Elsabagh, R. (2018). "Impact of pomegranate peel nanoparticles on quality attributes of meatballs during refrigerated storage". LWT, 89, 489–495.

Najjaa, H., Chekki, R., Elfalleh, W., Tlili, H., Jaballah, S., Bouzouita, N. (2020). "Freezedried, oven-dried, and microencapsulation of essential oil from Allium sativum as potential preservative agents of minced meat". Food Science & Nutrition, 8(4), 1995–2003.

Nkurunziza, D., Sivagnanam, S.P., Park, J-S., Cho, Y-J., Chun, B.S. (2021). "Effect of wall materials on the spray drying encapsulation of Brown seaweed bioactive compounds obtained by subcritical water extraction". Algal Research, 58, 102381. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102381>

Oliveira, F.M., Oliveira, R.M., Buchweitz, L.T.G., Pereira, J.R., Hackbart, H.C.S., Nalério, E.S., Borges, C.D., Zambiasi, R.C. (2022). "Encapsulation of olive leaf extract (*Olea europaea* L.) in gelatin/tragacanth gum by complex coacervation for application in sheep meat hamburger". Food Control, 131, 108426.

Olivares-Tenorio, M-L., Cortes-Prieto, C-M., Londoño-Univio, N-C., Rojas-Díaz, D-A., Quintanilla-Carvajal, M-X., Tibaquira-Perez, L-N., Ricaurte-Puentes, L-Y., Rada-Bula, A-I,

Romero, H-M., Garcia-Nuñez, J-A. (2024). "Bioactive compounds in palm oil: A comprehensive review of recent advances in physicochemical characteristics, health-promoting properties and technologies for extraction, concentration, fractionation, encapsulation and functional food applications". *Journal of Food Composition and Analysis*, 132, 106306. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106306>

Radünz, M., Hackbart, H.C.S., Camargo, T.M., Nunes, C.F.P., Barros, F.A.P., Magro, J.D., Filho, P.J.S., Gandra, E.A., Radünz, A.L., Zavareze, E.R. (2020). "Antimicrobial potential of spray drying encapsulated thyme (*Thymus vulgaris*) essential oil on the conservation of hamburger-like meat products". *International Journal of Food Microbiology*, 330, 108696.

Rahnemoon, P., Sarabi-Jamab, M., Bostan, A., Mansouri, E. (2021). "Nano-encapsulation of pomegranate (*Punica granatum* L.) peel extract and evaluation of its antimicrobial properties on coated chicken meat". *Food Bioscience*, 43(3), 101331. DOI:10.1016/j.fbio.2021.101331

Sarmast, E., Foudjing, G.G.D., Salmieri, S., Lacroix, M. (2023). "Application of combined essential oils and bacteriocins encapsulated in gelatin for bio-preservation of meatballs". *Journal of Food Safety*, 43, 13080. <https://doi.org/10.1111/jfs.13080>

Smaoui, S., Hlima, H.B., Braïek, O.B., Ennouri, K., Mellouli, L., Khaneghah, A.M. (2021) "Recent advancements in encapsulation of bioactive compounds as a promising technique for meat preservation". *Meat Science*, 181, 108585.

Snoussi, A., Chouaibi, M., Koubaier, H-B-H., Bouzouita, N. (2022) Encapsulation of Tunisian thyme essential oil in O/W nanoemulsions: Application for meat preservation. *Meat Science*, 188, 108785.

Soyuçok, A., Kılıç, B., Başığit-Kılıç, G. (2019). "Et Ürünlerinde Enkapsülasyon Teknolojisinin Kullanımı". *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 102-110.

Surendhiran, D., Li, C., Cui, H., Lin, L. (2020). "Fabrication of high stability active nanofibers encapsulated with pomegranate peel extract using chitosan/PEO for meat preservation". *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100439.

Tometri, S.S., Ahmady, M., Ariaii, P., Soltani, M.S. (2020). "Extraction and encapsulation of *Laurus nobilis* leaf extract with nano-liposome and its effect on oxidative, microbial, bacterial and sensory properties of minced beef". *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(6), 3333–3344.

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

Vafania, B., Fathi, M., Soleimanian-Zad, S. (2019). "Nanoencapsulation of thyme essential oil in chitosan-gelatin nanofibers by nozzle-less electrospinning and their application to reduce nitrite in sausages". *Food and Bioproducts Processing*, 116, 240–248.

Vázquez-González, Y., Prieto, C., Filizoglu, M.F., Ragazzo-Sánchez J.A., Calderón-Santoyo, M., Furtado, R.F., Cheng, H.N., Biswas, A., Lagaron, J.M. (2021). "Electrosprayed cashew gum microparticles for the encapsulation of highly sensitive bioactive materials". *Carbohydrate Polymers*, 264, 118060. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118060>

Zhang, L., Piao, X. (2023). "Use of aromatic plant-derived essential oils in meat and derived products: Phytochemical compositions, functional properties, and encapsulation". *Food Bioscience*, 53, 102520. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102520>

Zhang, D., Ivane, N.M.A., Haruna, S.A., Zekrumah, M., Elysé, F.K.R., Tahir, H.E., Wang, G., Wang, C., Zou, X. (2022). "Recent trends in the micro-encapsulation of plant-derived compounds and their specific application in meat as antioxidants and antimicrobials". *Meat Science*, 191, 108842. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108842>

Zhu, Y., Gu, M., Su, Y., Li, Z., Xiao, Z., Lu, F., Han, C. (2024). "Recent advances in spoilage mechanisms and preservation technologies in beef quality: A review". *Meat Science*, 213, 109481. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109481>

Xu, R., Deng, W., Dai, Y., Hu, J. (2022). "pH-responsive citral microcapsules with tannic acid-*feiii* coordination complexes". *Food Chemistry*, 397, 133715. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133715>

Xu, Y., Yan, X., Zheng, H., Li, J., Wu, X., Xu, J., Zhen, Z., Du, C. (2024). "The application of encapsulation technology in the food Industry: Classifications, recent Advances, and perspectives".