

Soğuk Atmosferik Plazma Teknolojisi ve Gıdalarda Kullanımı

Çile YANĞIÇ YÜKSEL¹ ID, Nural KARAGÖZLÜ*¹ ID¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, MANİSA.

Özet: Mikroorganizmaların gelişimini durdurmak veya mikroorganizmaları öldürmek yoluyla gıdaların raf ömrünün uzatılması amacıyla kullanılan pastörizasyon, sterilizasyon, kurutma, dondurma gibi işlemlerin; tat, koku, doku değişikliği, vitamin kaybı gibi etkilere sebep olması, alternatif işlemlere olan gereksinimi artırmaktadır. Bu kapsamda soğuk plazma teknolojisi son yıllarda mikrobiyal inaktivasyonda kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar bu teknoloji ile uygulanan işlemin, mikrobiyal inaktivasyon açısından etkin sonuçlar verdiğini ve işlemin oda sıcaklığında uygulandığında özellikle besin değerindeki kayıpların düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca ürünün duyu özelliklerinin olumsuz etkilenebilmesi ve ekonomik olması da yöntemin avantajları arasında sayılmaktadır. Bu derlemede soğuk plazmanın tanımı, sınıflandırılması, etki mekanizması, soğuk plazma tekniği, gıda sanayiinde kullanım alanları ve bu konu üzerinde yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmalar, soğuk plazmanın mikrobiyal inaktivasyonda başarılı bir şekilde kullanıldığını göstermekle beraber, plazma yapısının karışık olması ve aydınlatılması gereken noktalar olduğundan konu üzerinde araştırmaların devam etmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: soğuk plazma, ısısal olmayan teknolojiler, raf ömrü, antimikrobiyal etki

Atmospheric Cold Plasma and its Application in Foods

Abstract: Heat treatment, pasteurization, sterilization, drying and freezing, which are used to extend shelf life of food that cause loss of taste, texture and vitamin in food, increase the demand for alternative processes. In this content, cold plasma technology is used for microbial inactivation in recent years. Studies show that this process is an effective method for microbial inactivation. Also, nutritional loss of nutritional value in this process is low when applied at room temperature. Moreover, being an economic process and preserving organoleptic properties of the food are among the advantages of the method. In this review, the definition, classification, mechanism of action of cold plasma technique, its use in food industry and the studies on this subject are discussed. Studies show that cold plasma is successfully used in microbial inactivation. However, plasma structure is complicated and there are aspects to be clarified in the plasma structure so further the studies should continue on this subject.

Keywords: cold plasma, nonthermal technology, shelf life, antimicrobial effect

GİRİŞ

Özellikle son yirmi yılda üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış olmasına karşın plazma, Moreau ve ark. (2008) tarafından “doğal yapısı gereği, mekanizması tam olarak anlaşılamamış çok karışık bir süreç” olarak ifade edilmiştir. Plazmaların mühendislik, tıp, fizik, kimya, gıda gibi geniş alanlarda kullanımı söz konusudur. Soğuk plazma sisteminin gıda güvenliği alanında kullanımı ise oldukça yeni bir kavramdır. Gıda kaynaklı patojenlerin hastalıklara hatta ölümlere yol açması, bunun sonucunda yaşanan ekonomik kayıplar ve tüketicilerin güvenli gıdaya olan talebi bu yeni teknolojiye olan ilgiyi artırmıştır. Bu teknolojinin mikroorganizmaları kısa sürede ve etkili bir şekilde inaktif ettiği saptanmış; Kim ve ark. (2011), bu yöntemin gıda ürünlerinin daha kolay ve daha ucuz dekontaminasyonunu sağlayacağından, gelecekte geleneksel gıda koruma yöntemlerinin yerine geçebilecek bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Fernández ve ark. (2013) soğuk plazma yönteminin antimikrobiyal etkisinde hücre yapısının, hücre fizyolojisinin, plazma direnciyle ilgili bakteriyel stres direncinin çok önemli olduğunu ve anlaşılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu derlemede soğuk plazmanın tanımı, sınıflandırılması, etki mekanizması, soğuk plazma tekniğinin kullanım alanları ve bu konu üzerinde yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

SOĞUK ATMOSFERİK PLAZMA ve KULLANIM ALANLARI

Soğuk plazma teknolojisi, ısısal olmayan teknolojiler arasında en yeni teknolojilerden biri olarak yer almaktadır. Plazma ilk olarak Sir William Crookes tarafından 1879 yılında tanımlanmış, daha sonra 1897’de Thomson tarafından elektron ışınları (demeti) keşfedilmiştir (Baysal ve İçier, 2012; Korachi ve ark., 2015). Düzgün bir biçim veya hacme sahip olmama ve manyetik alanda filament, ışın veya çift katman oluşturabilme özelliklerinden dolayı plazma “maddenin dördüncü hali” olarak kabul edilmektedir. Plazma ayrıca iyonik

gaz veya elektronlardan oluşmuş gaz bileşikleri, polar iyonlar, gaz atomları, temel ve uyarılmış durumdaki moleküller ve elektrik alanın uygulanmasıyla meydana gelen ışık kuantasından oluşan gaz bileşimi olarak da tanımlanabilmektedir (Baysal ve İçier, 2012). Vakum altında ve oda sıcaklığındaki bazı gazların bir elektrik akımı veya elektromanyetik radyasyon uygulaması sonucu oluşan işlem soğuk plazma olarak tanımlanmaktadır (Fernandez ve Thompson, 2012). Soğuk plazmanın gaz sıcaklığı ortalama 300–400°K aralığında olup; moleküller, iyonlar ve elektronlar termodinamik olarak dengede bulunmazlar. Elektron sıcaklığı 10⁴–10⁵°K (1–10 eV), iyon sıcaklığı da oda sıcaklığına yakın olması nedeniyle bu işleme soğuk plazma adı verilmiştir. Uygulama 10 Tor (10 mbar) basınç ve 1–5 eV elektron enerjisindeki flartlar altında uygulanmaktadır (Niemira 2012). Soğuk atmosferik plazma kontamine olan yüzeylerin dekontaminasyonu, materyallerin yüzey işlenmesi, tıbbi aletlerin sterilizasyonu, gıda güvenliğinin sağlanması gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Yöntemin bakterilerin inaktivasyonunda kullanılabileceği ilk kez 1996 yılında Laroussi tarafından belirtilmiştir (Driks ve ark., 2012; Patil ve ark., 2014). Plazmalar günümüzde mikroelektronik teknolojisi, materyallerin işlenmesi, yüzey görüntüleme, elektron ve iyon demetli basım, düz panel ekran, yarı iletken çip üretimi, antikorozyon kaplama, paketleme materyallerinin geçirgenlik özelliklerinin geliştirilmesi, gıda maddelerinde ambalajlama materyali gibi çok çeşitli ticari uygulamalarda kullanılabilmektedir (Chu, 2007). Lacombe ve ark. (2015)’da

*Sorumlu Yazar: nural.karagozlu@cbu.edu.tr

Geliş Tarihi: 4 Ağustos 2017

Kabul Tarihi: 14 Aralık 2017

yöntemin canlı dokularda zarara neden olmadan, gıda, su, hava ve medikal aletlerin yüzey sterilizasyonu ve biyodekontaminasyonu için kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Ayrıca bu yöntemin dişçilik, ilaç, ısıya duyarlı plastiklerden üretilen medikal cihazların yüzeyindeki kimyasalların uzaklaştırılması gibi tıp alanlarında, paketleme malzemelerinin sterilizasyonu ve dekontaminasyonu, tekstil (yün, naylon, pamuk, dokuma ve dokuma olmayan tekstil ürünleri) ve paketleme malzemelerinin yüzey modifikasyonu, gıda ve tarım ürünlerinin sanitasyonu, elma gibi enzimatik esmerleşme görülen bazı gıdalardaki polifenolksidaz enziminin inaktivasyonu ile ilgili alanlar dahil olmak üzere değişik alanlarda kullanılabilceği bildirilmiştir (Kim ve ark., 2014; Korachi ve ark.,2015; Tappi ve ark., 2014). Bu teknolojinin gıda üretiminde doğru uygulanabilmesi ve kullanılabilmesi için plazmanın karakterize edilmesi ve reaktif türlerin organik yüzeyler ile olan etkileşiminin daha iyi anlaşılması gerekmektedir (Mastwijk ve Nierop Groot, 2010). Soğuk plazma teknolojisi yeni bir teknoloji olduğundan tek bir sınıflandırma çeşidinden bahsedilememekte, farklı araştırmacılar tarafından farklı sınıflandırmalar yapılmaktadır. Fernández ve Thompson (2012)'a göre yüzey dekontaminasyonu için soğuk plazma kaynakları; kademeli yalıtkan bariyer boşaltıcı (Cascaded Dielectric Barrier Discharge, CDBD), kayma arkı plazma boşaltıcı (Gliding Arc Plasma Discharge, GAPD), dirençli bariyer boşaltıcı (Resistive Barrier Discharge, RBD) ve soğuk atmosferik plazma jetleri (CAP) olarak gruplandırılmaktadır. Bunların içinde CDBD yönteminin dekontaminasyon açısından en etkili olduğu belirtilmiştir.

Plazmalar termodinamik özelliklerine göre de sıcak ve soğuk plazmalar diye sınıflandırılmaktadır (Fridman ve ark., 2007). Soğuk plazma sterilizasyon yöntemleri, çalışan ortam basıncına göre de başlıca 2 sınıfa ayrılır. Birincisi düşük basınçta elde edilen plazmadır. Bunlar iki farklı şekilde çalışır. Birincisi mikrodalga ile çalışan soğuk plazma sistemleri olup, diğeri radyo frekansı ile çalışan soğuk plazma sistemleridir. Birincisinin çalışma sistemi mikrodalgaların çalışma prensibine benzer. Radyo frekansı ile çalışan sistemler uzun yıllardır kullanılmakta olup, frekans aralıkları Hz değerlerinden yüksek MHz değerlerine kadar değişmektedir. Hızlı periyodik elektriksel uyarılar kullanarak ve sistemde kullanılan gazları da farklı voltajda ve güçte çalıştıran iyonlaşma sağlanır (Niemira, 2012).

Düşük basınçta çalışan plazma sistemlerinde kullanılan vakum ekipmanlarının pahalı olması ve sistemin kesikli çalışması maliyetleri arttırmakta ve zaman açısından da dezavantaj yaratmaktaydı. Bu nedenle, gerek laboratuvar gerekse sanayi ölçekli 1 atm'de çalışan daha ekonomik ve işlevsel soğuk plazmalar geliştirilmiştir. Böylelikle; Korona boşaltım plazması, Dielektrik bariyer boşaltım plazmaları (DBD), Atmosferik basınç plazma jeti (APPJ), Işıltılı boşaltım plazması, Ark boşaltım plazması, Radyo frekansı plazmaları olarak farklı özelliklerde atmosferik soğuk plazma teknikleri geliştirilmiştir (Bozkurt, 2014; Niemira, 2012).

Soğuk plazmanın sıcaklığı yaklaşık 30–60°C arasındadır. Misra ve ark. (2011), bu sıcaklığın kullanımının düşük enerji maliyeti gerektirmesinden ötürü gıda sanayiinde tercih nedeni olduğunu belirtmişlerdir. Yöntemin uygulanmasında direkt ve indirekt olmak üzere 2 farklı yaklaşım vardır. Direkt uygulamada örnek plazmayla doğrudan temastadır. "Afterglow" olarak anılan

indirekt uygulamada ise örnek plazmadan biraz uzağa yerleştirilir ve sadece reaktif türlere maruz kalır. Ambalajlı ürünlere yöntemin uygulanması, uygulama sonrası kontaminasyonun önüne geçmek için avantaj sağlar. Uygulamada plazmanın; gıdanın su, yağ, protein, karbonhidrat, fenolik bileşikler gibi bileşenleriyle etkileşimde bulunmasına rağmen, gıdanın içine nüfuz etmediği ve değişimin sadece gıda yüzeyinde olduğu bildirilmiştir.

Yöntemin avantajları şu şekilde belirtilmiştir (Niemira, 2012; Pankaj ve ark., 2014; Yasuda, 1984):

- Düşük sıcaklıklarda güçlü bir sterilizasyon sağlayabilmesi,
- Polimer yüzeye yapışan mikroorganizmaları kısa sürede etkili bir şekilde inaktif edebilmesi,
- Atmosferik basınçta sürekli ve açık olarak çalışabilmesi, buna ek olarak kimyasal ve su içermemesi,
- Çok pahalı ekipmanlara gereksinim duyulmaması,
- Daha az enerji tüketimine neden olması,
- Düşük maliyetli olması,
- Çalışır durumdayken sistemin kendini temizleyebilmesi,
- Lokal uygulama olanağının bulunması,
- Gıdada duyuusal ve fiziksel özelliklerde önemli değişikliğe neden olmaması,
- Polimer esaslı materyallerin etkileşiminden gıdayı koruyabilmesi,
- Ambalajın yapısına etki etmemesi,
- Yüzey kaplamanın çok homojen ve ince olması,
- Toksik atık bırakmadığından operatör için zararsız olması,
- Plastik şişeler, kapaklar ve filmler gibi ambalaj materyallerinin kalıntı bırakmadan hızlıca sterilize edilebilmesi.

Plazma ile sterilizasyon, etilen oksit veya formaldehit ile yapılan sterilizasyona göre daha az alet ekipmana ihtiyaç göstermesi nedeniyle daha kısa sürede yapılmaktadır. Ayrıca ıslak kimyasal uygulamalarla kıyaslandığında zaman alıcı ön hazırlık ve kimyasal kullanımı gerektirmediği ve aynı zamanda atık oluşumuna neden olmadığı için çevre dostu teknoloji olarak kabul edilmektedir (Yangılar ve Oğuzhan, 2013).

SOĞUK PLAZMA TEKNOLOJİSİNİN GIDALARA UYGULANMASI

Soğuk atmosferik plazma sistemleri birçok vejetatif Gram negatif ve Gram pozitif bakteriler, mayalar, küfler ve endosporların dekontaminasyonunda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Rod ve ark., 2012). Aşağıda örnekler verilen birçok araştırmada; Elma, çilek, yaban mersini, pitaya gibi çeşitli meyvelerin, patates, havuç, salatalık, domates, çeri domatesi, soğan, marul gibi çeşitli sebzelerin ve suyun dekontaminasyonunda soğuk plazma sistemi kullanılmıştır. Plazma yönteminin suda *Echerichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Streptococcus mutans*, *Aspergillus niger*, *Candida albicans* ve yeşil alg de dahil olmak üzere birçok mikroorganizmanın etkin dekontaminasyonu için uygun olduğu tespit edilmiştir. Mango, kavun gibi sert kabuklu meyvelerin ve taze kesilmiş meyvelerin yüzeyinden, dolmalık biberden, bademden mikroorganizmaların dekontaminasyon çalışmalarında; ayrıca yumurta, meyve suyu, tavuk eti, kümes hayvanı eti, kurutulmuş et, domuz pastırması, fındık, baklagiller, kahverengi pirinç, kırmızıbiber sosu, mısır salatası, peynir ve et ürünlerine soğuk plazma sistemlerinin uygun olduğu

belirtilmiştir (Bahrami ve ark., 2016; Basaran ve ark., 2008; Deng ve ark., 2007; Kim ve ark., 2011; Misra ve ark., 2014). Yöntem bakteri türü ve kullanılan plazma sistemine göre değişiklik göstermekle birlikte, genellikle vejetatif hücreler sporlara göre daha duyarlıdır. Ayrıca Gram negatif ve Gram pozitif bakterilerle yapılan çalışmalarda, Gram negatif bakterilerin murein tabakasının Gram pozitif bakterilere göre daha ince olması nedeniyle, plazmanın reaktif oksijen türlerine karşı daha duyarlı olduğu saptanmıştır (Baysal ve İçier, 2012). Soğuk plazmalar 3 mekanizma yoluyla bakteri ölümüne sebep olmaktadır (Moisan ve ark., 2001):

1. Enerji kaynağı olarak UV kullanıldığında DNA'nın yıkımı,
2. Gaza dönüşebilen atomik bileşiklerin uçurulması,
3. Oksijen atomlarından yararlanılarak, yavaş yanma sonucu oluşan gaza dönüşebilen bileşenlerden yüzeyden kopma etkisi (etching) sonucu mikroorganizmanın atomik düzeyde aşınması.

Ayrıca soğukatmosferik plazma uygulamasında ve antimikrobiyal etkinin saptanmasında; gaz cinsi ve kompozisyonu, uygulama süresi, gıda matrisinin yüzey özellikleri, bağlı nem, plazmanın uygulama yöntemi, akış hızı, giriş gücü, boşaltım tipi gibi proses parametrelerine ilaveten bakteriyel yük, bakterinin bulunduğu substrat, sıcaklık, pH, büyüme ortamının kompozisyonu gibi bir çok faktör önemlidir (Fernández ve ark., 2013; Fernández ve Thompson, 2012). Plazmanın kaynağını UV protonları, yüklü parçacıklar ve reaktif türler (süperoksit, hidroksil radikaller, nitrik asit ve azot) oluşturur (Rod ve ark., 2012). Misra ve ark. (2014) oksijen ve azot gaz plazmalarının bakteri, virüs ve sporların inaktivasyonunda çok etkili olduğunu; Hurry ve ark. (1998) ise saf argon plazmasının spor inaktivasyonunda oksijen, H₂O₂ ve CO₂ plazmalarına göre daha az etkili olduğunu bildirmişlerdir.

Noriega ve ark. (2011) tavukların etlerine ve derisine inokule etikleri *Listeria innocua*'nın soğuk atmosferik plazma yöntemi uygulayarak, sterilizasyon etkisini araştırmışlardır. Belirlenen şartlar altında *L. innocua* bakterisinin 10 sn, 8 dk ve 4 dk'lık uygulamalarının hepsinde de 3 logaritmalık düşüş olduğunu bildirmişlerdir. Soğuk atmosferik plazma yönteminin *L. innocua* üzerinde sterilizasyon etkisine ek olarak gıdalardaki ticari uygulamalarda bu yöntemin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Ragni ve ark. (2010) yumurta kabuklarında yüzey dekontaminasyonu sağlamak amacıyla yaptıkları çalışmada ise, 15 kV güç, %35 ve %65 bağlı nem, 25°C sıcaklık, 90 dk. süre ile uygulanan işlem sonucunda *S. typhimurium* ve *S. enteritidis* sayısının 5.5–5.6 log kob/yumurta kabuğu'ndan 2.5–4.5 log kob/yumurta kabuğu seviyesine indiğini saptamışlardır. Rod ve ark. (2012), *L. innocua* inoküle edilmiş dilimli bresaolalarda soğuk atmosferik basınç plazma ile sterilizasyon olanağını araştırmışlardır. Örnekleri %30 oksijen ve %70 argon içeren düşük yoğunluklu polietilen ambalajlarda 2–60 sn. için 15.5, 31 ve 62 W plazma ile muamele etmişlerdir. Araştırmacılar ürünlerin yüzeyi için uygulamanın kullanabileceğini, ancak oksidasyona dikkat edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Kim ve ark. (2011) *L. monocytogenes*, *E. coli*, *S. typhimurium* inoküle edilen dilimlenmiş domuz pastırmasına farklı iki gaz kompozisyonu (helyum, helyum+oksijen), farklı güç (75, 100, 125 W) ve sürede (60 sn. ve 90 sn.) atmosferik basınç plazmasını uygulamışlardır. Helyum uygulamasında inoküle edilen patojen mikroorganizma sayısında 1–2

logaritmalık azalma gözlenirken, helyum+oksijen gaz karışımı uygulamasındaki örneklerde 2–3 logaritmalık azalma olduğu bildirilmiştir. Toplam aerobik bakteri sayısında ise helyum ile işlemden sonra 1.89 log helyum+oksijenle işlemden sonra 4.58 log azalma gözlenmiştir. Domuz pastırması işleme tabi tutulduktan sonra, artan renk değeri olan L değeri dışında anlamlı hiçbir değişiklik gözlenmemiştir. Araştırmacılar işlem sonrası kalite değişikliklerinin aydınlatılması için daha ileri çalışmalara ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Montenegro ve ark. (2002) basınçlı soğuk plazma sistemi kullanarak *E. coli* O157:H7'nin inaktivasyonu ile ilgili çalışmalarında, elma suyunda bakterinin 7 log kadar azaldığını tespit etmişlerdir. Surovsky ve ark. (2014) meyve suyundaki *Citrobacter freundii* üzerine soğuk plazmanın etkisinin araştırıldığı çalışmalarında; argon ve %0.1 oksijen kullanılarak 480 sn plazma uygulamadan sonra 24 sa depolama süresi sonunda *C. freundii* sayısında yaklaşık 5 log düşüş gözlenmiştir. Başarılı bir inaktivasyon için bakteri hücreleri ile plazma arasında doğrudan temas olmasına gerek olmadığı mikrobiyal inaktivasyonda özellikle H₂O₂ ve hidroperoksit radikallerin etkili olduğu belirtilmiştir.

Optimum koşullar altında marul, çilek ve patatesteki *S. typhimurium*'un canlılığının araştırıldığı bir çalışmada ise 2 dk sonunda 2.71 log; 15 dk sonunda ise sırasıyla 2.72, 1.76 ve 0.94 log azalma olduğu gözlenmiştir (Fernández ve ark., 2013). Aynı çalışmada farklı çeşit taze gıdalardaki *S. typhimurium*'un inaktivasyonunda soğuk atmosferik basınç plazma uygulama veriminin, gıdaların yüzey özelliklerine, topografik yapısına bağlı olduğu belirtilmiştir. Benzer olarak çeri domates ve çileğe inokule edilen *E. coli*, *S. enterica* serovar *Typhimurium* ve *L. monocytogenes*'in canlılığı üzerine soğuk atmosferik plazmanın antimikrobiyal etkisinin incelendiği bir başka çalışmada ise; 10, 60 ve 120 sn sonunda domateste *Salmonella*, *E. coli* ve *L. monocytogenes* popülasyonunun başlangıçtaki sayıdan saptanamayacak düzeye düşürüldüğü; kompleks bir yüzey yapısına sahip olan çilekte ise bakteriyel popülasyonu azaltmak için daha uzun işlem süresine ihtiyaç olduğu belirtilmiştir (Ziuzina ve ark., 2014). Bermúdez-Aguirre ve ark. (2013) 10⁵ ve 10⁷ *E. coli* kob/g inokule edilen marul, havuç ve domateste soğuk plazmanın etkisini araştırdıkları çalışmada; 10 sn ile 30 dk arasında, 3.95 kV ile 12.83 kV (60 Hz) argon arasında soğuk plazma işlemi uygulanmıştır. Havuçlarda ve marulda *E. coli* inaktivasyonunda 0.5 log'dan daha az azalma olduğu; ancak domateste uygulama süresine bağlı olarak inaktivasyon düzeyinin önemli derecede farklılık (p<0.05) gösterdiği bildirilmiştir. Araştırmacılar düşük miktardaki inokulasyonda bakterilerin inaktivasyonunun daha kolay olduğunu, ayrıca yüksek voltaj ve uzun işlem süresinin mikrobiyal inaktivasyonda etkili olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada domates ve marulun havuçtan daha kolay dezenfekte olduğu, bunun nedeninin ise yüzey yapıları arasındaki farklılık olabileceği belirtilmiştir. İşlem sonrası renk parametreleri arasında önemli değişiklikler görülmediği belirtilmiştir. Misra ve ark. (2014) ise yaptığı çalışmada; çilekler 50 hz'de 60 kV dielektrik bariyer boşaltıcı (DBD) ortamda, 40 mm elektrot boşluğuna karşı üretilen atmosferik soğuk basınç plazma ile %42 nispi nem ortama hava içeren kapalı pakette işlenmiştir. 5 dk işlem süresi sonunda başlangıç mikroflorasında (aerobik mezofilik bakteri, maya ve küf) 2 log azalma olduğu ve atmosferik soğuk plazma

işleminin çileğin rengine ve dayanıklılığına önemli etki yapmadığı belirtilmiştir. Lacombe ve ark. (2015) yaban mersininde aerobik mikroorganizmaların soğuk atmosferik plazma ile inaktivasyonu ve kalite özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Toplam aerobik plak sayımında tüm işlemlerde 1–7 gün depolama sonunda sırasıyla 0.8–1.6 log ve 1.5–2.0 log azalma ($p < 0.05$) ve antosiyaninlerde 90 sn sonunda önemli azalma gözlenmiştir. Yüzey renk ölçümleri L ve a değeri 120 sn, b değeri ise 45 sn sonunda etkilenmiş; sertlik 60 sn'den uzun sürelerde önemli oranda azalmıştır. Soğuk plazmanın yaban mersini üzerindeki mikroorganizmaları etkisiz hale getirebileceği ve ürünün güvenliği ve kalitesini artırmak için optimize edilebileceği belirtilmiştir. Matan ve ark. (2015) çalışmalarında taze kesilmiş pitayadaki *E. coli*, *S. typhimurium* ve *L. monocytogenes*'e karşı soğuk plazma ile %2.5–10 yeşil çay ekstraktının kombine antimikrobiyal aktivitelerini araştırmışlardır. 15 gün depolama sonunda %5 yeşil çay içeren su ekstraktı ve $4 \pm 1^\circ\text{C}$, 40W'da uygulanan soğuk plazma kombinasyonunun tüm patojenlere karşı inaktivasyon ve depolama süresinin uzatılması için kullanılabilirliğini saptamışlardır. Bozkurt, (2014) soğuk plazma uygulamasının kuşburnunun vitamin ve enzim aktivitesi üzerine etkilerini araştırdığı çalışmada, atmosferik plazma jet ve DBD olmak üzere iki farklı plazma sistemi ayrıca her bir sistemde farklı frekans aralığı, gaz akış hızı ve uygulama süresi denenmiştir. Çalışma sonucunda 8 sn'lik atmosferik plazma jeti ile plazma uygulaması yapılan askorbik asit çözeltilerinde kayıp en fazla 1000 L/sa gaz akış hızında ve 25 kHz'de %83.5 oranında olduğunu belirlemiştir. DBD ile yapılan çalışmada ise askorbik asit kaybının sadece He gazı kullanıldığında %30.4 ile en fazla; He–O₂ kullanıldığında ise en fazla %28.6 olduğu tespit etmiştir. 25 kHz'de, 1000 L/sa akış hızında 8 sn'lik plazma uygulamada model gıda olarak seçilen kuşburnu meyvesindeki askorbik asit miktarının en fazla %56.3 kayba uğradığı görülmüştür.

Deng ve ark. (2007) bademlerde soğuk plazma kullanarak *E. coli*'nin inaktivasyonunu araştırdığı çalışmada, 30 kV ve 2000 Hz'de 30 sn'lik uygulamanın yaklaşık 5 log azalmaya neden olduğunu ve bakterisidal etkinin uygulanan gerilim ve frekans ile arttığını belirtmişlerdir. Diğer yandan Başaran ve ark. (2008) fındık örneklerinde kükürt hekzaförür (SF₆) ve havagazı kullanarak düşük basınçlı soğuk plazma (LPCP) yöntemiyle *Aspergillus parasiticus* sayısındaki değişimi incelemişlerdir. Havagazının kullanıldığı plazma sterilizasyonunda 5 dk işlem süresinde 1 log'luk düşüş; 10 dk'lık sıcaklık uygulamasında ise 1 log'luk daha düşüşün olduğu görülürken, SF₆ plazma sterilizasyonunda ise yaklaşık 5 log'luk etkin bir düşüş kaydedilmiştir. Selçuk ve ark., (2008) ise, baklagil ve buğday örneklerinde SF₆ ve havagazını kullanarak LPCP yöntemiyle *Aspergillus* spp. ve *Penicillium* spp. sayılarındaki değişimi inceledikleri çalışmada; SF₆ plazma sterilizasyonunda 15 dk'da örneklerde 3 log'luk azalma saptandığını, ayrıca SF₆ ve hava gazı sterilizasyonunun tohumların yüzey inaktivasyonunda başarılı bir şekilde kullanılabilirliğini bildirmişlerdir. Yong ve ark. (2015) 250 W, 15 kHz DBD ile katı besiyerinde ve dilimlenmiş peynirde *E. coli*, *S. typhimurium* ve *L. monocytogenes* inaktivasyonunda uygulama sonrası depolama süresinin etkisini araştırmışlardır. Besiyerinde plazma ile muamele sonrası mikroorganizma sayılarında da, peynir dilimlerine inokule

edilen patojenler test edildiğinde de 3.10 ile 1.65 arasında log'luk azalmalar gözlenmiştir.

Patil ve ark. (2014) yüksek gerilim atmosferik soğuk plazma (HVACP) işlem parametrelerinin ve bağlı nemin kapalı bir ambalaj içindeki *Bacillus atrophaeus* sporlarının inaktivasyonunda etkisini araştırmışlardır. 60 sn uygulanan direkt plazma sonucunda test edilen spor sayısında 6 log'dan daha fazla; indirekt maruzda ise HVACP üretimi için kullanılan gaz tipine bağlı olarak (atmosferik gaz, %90 N₂+%10 O₂, %65 O₂+%30 CO₂+%5 N₂) spor sayısında 2.1 ile 6.3 log arasında azalma olduğunu saptamışlardır. Araştırmacılar bağlı nemin spor inaktivasyonunda kritik faktör olduğunu; %70 nemde HVACP ile 60 sn işlem sonunda sporlarda direkt uygulamada 6.3 log, indirekt uygulamada ise 5.7 log azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Soğuk atmosferik plazmanın gıda dışı uygulama alanları arasında; kanser hücrelerinin ve parazitlerin inaktivasyonunda da kullanılabilirliği bildirilmiştir (Ahn ve ark., 2011; Choe ve ark., 2012; Fricke ve ark., 2012; Ishaq ve ark., 2014; Klampfl ve ark., 2012). Ahn ve ark. (2011), soğuk atmosfer plazması uygulamasının rahimağzı kanseri HeLa hücrelerinin apoptotik ölümü üzerine etkili olurken, mitokondriyal membran potansiyelinin depolarizasyonunu da gerçekleştirmişlerdir. Bu etkilere rağmen uygulamanın kanser tedavisinde kullanılması umut verirken, biyolojik etkileri ve etki mekanizmasının daha iyi irdelenmesiyle açıklanması gerektiğini de bildirmişlerdir. Fricke ve ark. (2012), biyomedikal malzemenin yüzey temizliğinde uygulamayı denemişler. *Candida albicans*'lar üzerine etkinin lokalize olduğunu ifade etmişlerdir. Klampfl ve ark. (2012) çalışmalarında hassas tıbbi cihazların sterilizasyonunda soğuk atmosferik plazma uygulamasının umut verici olduğunu bildirmişlerdir. Gram negatif ve Gram pozitif bakterilerin 30 sn'lik plazma uygulaması ile 10⁴ ile 10⁶ kob azalmalar belirlerken. *C. albicans*'da inaktivasyonun zor olduğunu ifade etmişlerdir. *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus atrophaeus* ve *Geobacillus stearothermophilus* için deneysel D değerlerini (D_{23°C}) sırasıyla 0.3 dk, 0.5 dk, 0.6 dk ve 0.9 dk olarak saptamışlardır. Belirlenen desimal azalma süreleri (D değerleri), diğer referans yöntemleriyle elde edilen D değerlerinden belirgin olarak daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Ziuzina ve ark. (2014) ise soğuk plazma ile dekontaminasyon verimliliğinde optimum başarı elde edilebilmesi için; ürün tipi, ürünün yüzey özellikleri, bakteri tipi, gücü ve plazma türlerinin difüzyon kapasitesi gibi faktörlerin taze gıdalarla ilgili gıda güvenliği sorunları ile beraber bir bütün olarak ele alınması gerektiğini bildirmişlerdir.

SONUÇ

Plazmaların düşük sıcaklık uygulamalarıyla tek başına veya diğer antimikrobiyal uygulamalarla kombine halde kullanımı konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Birçok çalışmada bu teknoloji ile mikrobiyal canlılığın azaltılabildiği, hala birçok soru -ve yöntemin toksik etkileriyle ilgili yeterli çalışmaya ulaşılamamış- olmasına rağmen, soğuk plazmanın son derece umut verici bir gıda işleme aracı olduğu belirtilmektedir. Biyomedikal alanda sterilizasyon ve dekontaminasyon sağlamak yanında bu teknolojinin, hem gıda kaynaklı hastalıklardan korunmada potansiyel bir yöntem olacağı, hem de gıda işleme ve gıda güvenliği kapsamında sağlık ve ekonomik olarak daha büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Soğuk

plazma uygulamasının gıdanın fiziksel, kimyasal, duyuşal ve mikrobiyolojik kalitesi üzerine olumlu veya olumsuz etkilerini değerlendirmek için farklı yöntemlerin birlikte uygulandığı daha çok çalışmaya ihtiyaç vardır. Yeni gelişen soğuk atmosferik plazmalar, kombine yöntemlerle birlikte kullanıldığında gıda ürünleri dekontaminasyonu için kullanılabilir ve gelecekte geleneksel gıda koruma yöntemlerinin yerine geçebilecek bir yöntem olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahn HJ, Kim KI, Kim G, Moon E, Yang SS, Lee JS (2011) Atmospheric-Pressure Plasma Jet Induces Apoptosis Involving Mitochondria Via Generation of Free Radicals. *PLoS ONE*; 6(11):e28154. doi: 10.1371/j.pone.0028154.
- Bahrami N, Bayliss D, Chope G, Penson S, Pehinec T, Fisk ID (2016) Cold Plasma: A New Technology to Modify Wheat Flour Functionality. *Food Chemistry* 202: 247-253.
- Basaran P, Basaran-Akgul N, Oksuz L (2008) Elimination of *Aspergillus parasiticus* From Nut Surface With Low Pressure Cold Plasma (LPCP) Treatment. *Food Microbiology* 25: 626–632.
- Baysal T, İier F (2012) Gıda Mühendisliğinde Isıl Olmayan Teknolojiler. Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Bermúdez-Aguirre D, Barbosa-Cánovas G, Wemlinger E, Pedrow P, Garcia-Perez M (2013) Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma (APCP) on the Inactivation of *Escherichia coli* in Fresh Produce. *Food Control* 34: 149-157.
- Bozkurt D (2014) Soğuk Plazma Uygulamasının Vitaminler ve Polifenol Oksidaz (PFO) Enzimi Aktivitesi Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Choe W, Dan B, Jung H (2012) Effects of Atmospheric Pressure Plasma on Microorganisms and Human Cells. In *IEEE Conference on Plasma Science (ICOPS)*. Edinburgh: IEEE.
- Chu PK (2007) Enhancement of Surface Properties of Biomaterials Using Plasma-Based Technologies. *Surface and Coatings Technology* 201: 8076–8082.
- Deng S, Ruan R, Mok CK, Huang G, Lin X, Chen P (2007) Inactivation of *Escherichia coli* on Almonds Using Nonthermal Plasma. *Food Microbiology and Safety* 72(2): 62-66.
- Driks BP, Dobrynin D, Fridman G, Mukhin Y, Fridman A, Quinlan JJ (2012) Treatment of Raw Poultry with Nonthermal Dielectric Barrier Discharge Plasma to Reduce *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*. *Journal of Food Protection* 75: 22-28.
- Fernández A, Noriega E, Thompson A (2013) Inactivation of *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium on Fresh Produce by Cold Atmospheric Gas Plasma Technology. *Food Microbiology* 33: 24–29.
- Fernández A, Thompson A (2012) The Inactivation of *Salmonella* by Cold Atmospheric Plasma Treatment. *Food Research International* 45: 678-684.
- Fricke K, Koban I, Tresp H, Jablonowski L, Schroder K, Kramer A (2012) Atmospheric Pressure Plasma: A High-Performance Tool for the Efficient Removal of Biofilms. *PLoS ONE*. 7(8):e42539.
- Fridman G, Brooks AD, Balasubramanian M, Fridman A, Gutsol A, Vasilets VN, Ayan H, Friedman, G (2007) Comparison of Direct and Indirect Effects of Non-Thermal Atmospheric-Pressure Plasma on Bacteria. *Plasma Processes and Polymers* 4: 370-375.
- Hurry S, Vidal DR, Desor F, Pelletier J, Lagarde T (1998) A Parametric Study of the Destruction Efficiency of *Bacillus* spores in Low Pressure Oxygen-Based Plasmas. *Letters in Applied Microbiology* 26:417–421.
- Ishaq M, Evans MM, Ostrikov KK (2014) Effect of Atmospheric Gas Plasmas on Cancer Cell Signaling. *International Journal of Cancer* 134:1517–1528.
- Kim B, Yun H, Jung S, Jung Y, Jung H, Choe W, Jo C (2011) Effect of Atmospheric Pressure Plasma on Inactivation of Pathogens Inoculated onto Bacon Using Two Different Gas Compositions. *Food Microbiology* 28: 9-13.
- Kim J, Lee E, Choi E, Kim Y (2014) Inactivation of *Staphylococcus aureus* on the Beef Jerky by Radio-Frequency Atmospheric Pressure Plasma Discharge Treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technology* 22: 124–130.
- Klampfl T G, Isbary G, Shimizu T, Li Y F, Zimmermann J L, Stolz W (2012) Cold Atmospheric Air Plasma Sterilization Against Spores and Other Microorganisms of Clinical Interest. *Applied and Environmental Microbiology* 78: 5077–5082.
- Korachi M, Özen F, Aslan N, Vannini L, Guerzoni M, Gottardi D, Ekinci F (2015) Biochemical Changes to Milk Following Treatment by a Novel, Cold Atmospheric Plasma System. *International Dairy Journal* 42: 64-69.
- Lacombe A, Niemira BA, Gurtler J B, Fan X, Sites J, Boyd G, Chen H (2015) Atmospheric Cold Plasma Inactivation of Aerobic Microorganisms on Blueberries and Effects on Quality Attributes. *Food Microbiology* 46: 479-484.
- Mastwijk HC, Nierop Groot MN (2010) Cold Plasmas Used for Food Processing, *Encyclopedia of Biotechnology in Agriculture and Food* 1(1): 174 – 177.
- Matan N, Puanginda K, Phothisuwan S, Nisoa M (2015) Combined Antibacterial Activity of Green Tea Extract with Atmospheric Radio-Frequency Plasma Against Pathogens on Fresh-Cut Dragon Fruit. *Food Control* 50: 291-296.
- Misra NN, Tiwari BK, Raghavarao KS, Cullen PJ (2011) Nonthermal Plasma Inactivation of Food-Borne Pathogens. *Food Engineering Reviews* 3(4): 159-170.
- Misra NN, Patil S, Moiseev T, Bourke P, Mosnier JP, Keener KM, Cullen PJ (2014) In-Package Atmospheric Pressure Cold Plasma Treatment of Strawberries. *Journal of Food Engineering* 125: 131-138.
- Moisan M, Barbeau J, Moreau S, Pelletier J, Tabrizian M, Yahia LH (2001) Low Temperature Sterilization Using Gas Plasmas: A Review of the Experiments and An Analysis of the Inactivation Mechanisms. *International Journal of Pharmacology* 226: 1-21.
- Montenegro J, Ruan R, Ma H, Chen P (2002) Inactivation of *E. coli* O157:H7 Using a Pulsed Nonthermal Plasma System. *Journal of Food Science* 67: 646–648.
- Moreau M, Orange N, Feuilleley MGJ (2008) Non-Thermal Plasma Technologies: New Tools for Bio-Decontamination. *Biotechnology Advances* 26: 610-617.
- Niemira BA (2012) Cold Plasma Decontamination of Foods. *Annual Reviews of Food Science and Technology* 3: 125-142.
- Noriega E, Shama G, Laca A, Díaz M, Kong MG (2011) Cold Atmospheric Gas Plasma Disinfection of Chicken Meat and Chicken Skin Contaminated with *Listeria innocua*. *Food Microbiology* 7: 1293-1300.

- Pankaj SK, Bueno-Ferrer C, Misra NN, Milosavljevic V, O'Donnell C, Bourke P (2014) Applications of Cold Plasma Technology in Food Packaging. *Trends in Food Science and Technology* 35: 5-17.
- Patil ST, Moiseev NN, Misra PJ, Cullen JP, Mosnier KM, Keener P, Bourke M (2014) Influence of High Voltage Atmospheric Cold Plasma Process Parameters and Role of Relative Humidity on Inactivation of *Bacillus atrophaeus* Spores Inside a Sealed Package. *Journal of Hospital Infection* 88: 162-169.
- Ragni L, Berardinelli A, Vannini L, Montanari C, Sirri F, Elisabetta Guerzoni M, Guarnieri A (2010) Non-Thermal Atmospheric Gas Plasma Device for Surface Decontamination of Shell Eggs. *Journal Food Engineering* 100: 125-132.
- Rod SK, Hansen F, Leipold F, Knochel S (2012) Cold Atmospheric Pressure Plasma Treatment of Ready-To-Eat-Meat: Inactivation of *Listeria innocua* and Changes in Product Quality. *Food Microbiology* 30: 233-238.
- Selçuk M, Öksüz L, Başaran P (2008) Decontamination of Grains and Legumes Infected with *Aspergillus* spp. and *Penicillium* spp. by Cold Plasma Treatment. *Bioresource Technology* 99: 5104-5109.
- Surowsky B, Fröhling A, Gottschalk N, Schlüter O, Knorr D (2014) Impact of Cold Plasma on *Citrobacter freundii* in Apple Juice: Inactivation Kinetics and Mechanisms. *International Journal of Food Microbiology* 174: 63-71.
- Tappi S, Berardinelli A, Ragni L, Rosa MD, Guarnieri A, Rocculi P (2014) Atmospheric Gas Plasma Treatment of Fresh-Cut Apples. *Innovative Food Science and Emerging Technology* 21: 114-122.
- Yangilar F, Oğuzhan P (2013) Plazma Teknolojilerinin Gıda Endüstrisinde Kullanımı. *Gıda* 38(3): 183-189.
- Yasuda H (1984) Plasma Polymerization for Protective Coatings and Composite Membranes. *Journal of Membrane Science* 18: 273-284.
- Yong H, Kim H, Park S, Alahakoon A, Kim K, Choe W, Jo C (2015) Evaluation of Pathogen Inactivation on Sliced Cheese Induced by Encapsulated Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma. *Food Microbiology* 46: 46-50.
- Ziuzina D, Patil S, Cullen PJ, Keener KM, Bourke P (2014) Atmospheric Cold Plasma Inactivation of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium and *Listeria monocytogenes* Inoculated on Fresh Produce. *Food Microbiology* 42: 109-116.