

Vurgulu Elektrik Alan Teknolojisi (PEF): Sistem ve Uygulama Odacıkları

Erdal Ağçam^{1,✉}, Asiye Akyıldız¹, Gülsün Akdemir Evrendilek²¹Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Adana²Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bolu

Geliş Tarihi (Received): 09.12.2013, Kabul Tarihi (Accepted): 07.02.2014

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): eagcam@cu.edu.tr (E. Ağçam)

☎ 0 322 338 65 37 📠 0 322 338 66 14

ÖZET

Günümüzde tüketicinin kaliteli, tazesine yakın ve mikrobiyolojik olarak güvenilir gıdalara olan talebi artmaktadır. Bunun için düşük işleme sıcaklıkları ile gıdaların güvenliğini sağlayan, besin ve duyu özelliklerini ise koruyan yeni nesil işleme teknolojileri kullanılmaktadır. Bu yeni teknolojilerin önde gelenlerinden biri de vurgulu (atımlı) elektrik alan uygulamasıdır. Vurgulu elektrik alan teknolojisinin esası, gıdaya mikro saniyelerle ifade edilen, çok küçük zaman dilimlerinde uygulanan yüksek voltajın enzimler ve mikroorganizmalar üzerindeki inaktivasyonu etkisine dayanır. PEF sistemi yüksek voltajlı bir vurgu jeneratörü, uygulama odacığı, akış kontrol sistemi, kontrol ve monitör aygıtından oluşmaktadır. Süreç içerisinde PEF teknolojisinde önemli aşamalar kaydedilmiş ve bu teknoloji günümüzde sıvı gıdalara başarılı bir şekilde uygulanabilir duruma gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Vurgulu elektrik alan (PEF), PEF sistemi bileşenleri, Uygulama odacıkları

Pulsed Electric Fields Technology (PEF): System and Treatment Chambers

ABSTRACT

Demand for high quality, microbiologically safe foods with fresh like properties have been increased recently. In order to achieve this, new age processing technologies at lower processing temperatures for preservation of nutritional and sensory properties as well as providence of food security are used. One of the frontier technologies among those is the pulsed electric field (PEF) processing. The basic of the PEF is the application of the short burst of high voltage electrical energy in microseconds which has the inactivation effect on both microorganisms and enzymes. PEF systems are composed of a high voltage pulse generator, PEF chambers, trigger generator, fluid handling system, control and monitoring devices. Important developments have been achieved with recent developments in PEF technology, and today this technology is at the state where it can successfully be used in processing of liquid foods.

Key Words: Pulsed electric fields (PEF), PEF system components, Treatment chambers

GİRİŞ

Yüksek frekansta ve şiddette elektrik alanı uygulamasına dayanan vurgulu elektrik alan (PEF) teknolojisi gıda kökenli patojen ve gıdada bozulma etmeni olan mikroorganizmaları kontrol altına almak için uygulanan ve ısı olmayan bir gıda koruma prosesidir. Bu teknoloji ile ısı işlem uygulamadan gıdanın raf ömrü uzatılabilir, ayrıca gıdanın mikrobiyal güvenliği

sağlanırken doğal özellikleri de daha iyi korunmaktadır. PEF teknolojisinin mikroorganizmalar üzerindeki ölümcül etkisi, ısı işlemlerde olduğu gibi sadece ısının iletimi veya taşınımı yoluyla sınırlı değildir. Elektrik alan volumetrik bir etkiye sahiptir ve bu etki sayesinde ölümcül koşullar, tüm ürüne hızlı ve homojen olarak aktarılmaktadır. PEF teknolojisi, özellikle akışkan gıdalarda gerek laboratuvar koşullarında gerekse pilot düzeneklerle başarılı olarak kullanılmıştır. Hatta bu

teknoloji birçok üründe geleneksel ısıtım işlem teknolojisi yerine geçebilecekken bazı ürünlerde ısıtım işlem uygulamalarının tamamlayıcısı olarak önerilmektedir [1].

PEF teknolojisi alanında yapılan çalışmalar, sıvı gıdaların düşük sıcaklıklardaki mikroorganizma inaktivasyonu üzerine yoğunlaşmasına rağmen, gıda endüstrisinde başka amaçlarda kullanılması için de araştırmalar yapılmaktadır. Bunlar, hücre içi metabolit ekstraksiyonunun geliştirilmesi, kurutma etkisinin artırılması, enzimatik aktivitenin değişimi, katı ve yarı katı gıda ürünlerinin korunması, sıvı artıkların dezenfekte edilmesi ve gıda bileşenlerinin fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilmesi olarak özetlenebilir. PEF teknolojisinin alternatif amaçlar doğrultusunda kullanılması, uygulamanın sahip olduğu elektrik alan yoğunluğuna göre değişir. İstendiğinde bakterisit etki ile inaktivasyon sağlanabilir veya kurutmada olduğu gibi kurutma işlemi boyunca mikroorganizma çoğalmasının önüne geçilebilir.

PEF teknolojisinin, gıda koruma amacıyla kullanımı için yapılan çalışmalar batılı ülkelerde 40 yılı aşkındır sürdürülmektedir. Ayrıca bu teknolojinin yakın gelecekte sıvı gıdaların işlenmesinde geleneksel ısıtım işlem yönteminin yerine geçeceği veya en azından ısıtım işlem uygulamalarının tamamlayıcısı olabileceği bildirilmektedir. Ülkemizde PEF teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar halen sınırlı sayıdadır. Bu nedenle bu derlemede yeni nesil gıda işleme teknolojilerinden biri olan PEF'in tanıtılması ve bu teknolojiyi meydana getiren temel sistemsel bileşenlerin özellikleri incelenmektedir.

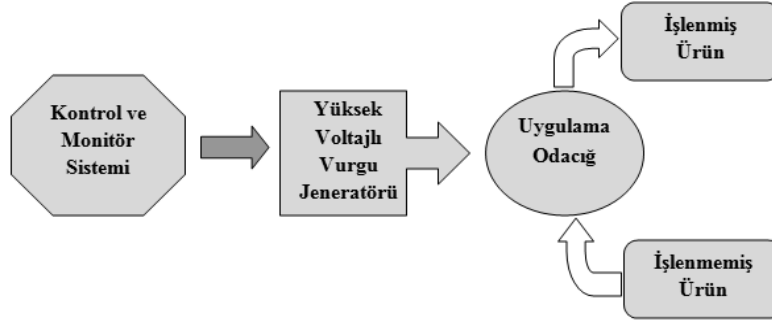
PEF TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİM TARİHİ

19. yüzyılın sonlarına doğru *Elektro-Pure* proses olarak bilinen yöntem sütü elektrik akımı kullanılarak pastörize etmek için kullanılmıştır. *Elektro-Pure* yöntemi sütün içinden elektrik akımını geçirip sütün sıcaklığını yükseltmeyi amaç edinmiş ve böylece bir ısıtım işlem uygulaması olarak tanıtılmış olmasına rağmen, birkaç araştırmacı bu uygulamanın kendine has bir bakteriyositik etkisinin olup olmayacağı sorusunu ortaya atmış ve pastörizasyon uygulamalarından etkilenmeyen bakterilerin bu yöntemle yok edilebileceğini iddia etmiştir. *Elektro-Pure* işlemini kullanarak birçok araştırmacı grubu 220-4200 V aralığında çeşitli çalışmalar yapmış ve aralarından sadece birkaçı bu proses koşulları altında bakterilerin termal ölüm noktalarının altında yok edildiğini bildirmişlerdir [1]. 1949'lu yıllarda Flaumenbaum elektriğin gıda proseslerinde uygulaması ile ilgili bir çalışma yayınlamıştır. Bu çalışma meyve suyunun elektrik uygulamaları ile ekstraksiyonunun kolaylaştığını bildirmektedir [2]. 1960'lı yıllarda Doevenspeck vurgulu elektrik alanın mikroorganizmalar üzerine etkisini ilk kez konu alan bir patent talebinde bulunmuş ve akabinde vurgulu elektrik alan ve hücre duvarı arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmasını yayınlamıştır. Bu patenti takiben Sale ve Hamilton bakteriyel dekontaminasyon metodu olarak birçok bulguyu yayınlamışlardır. Bu çalışmalar

vurgulu elektrik alan teknolojisinin temellerini ortaya koymuş olup; günümüzde bile geçerliliğini korumaktadırlar. Araştırmacılar doğrudan akım vurgularının bakteri hücre zarının yarı geçirgenliğinde hasara yol açtığını örneklerle ispatlamış ve geçirgen özelliklerinin kaybı ile hücre ölümünün gerçekleştiğini saptamışlardır. Ayrıca PEF' in etkisini akım yoğunluğu, enerji girişi, elektrik alan kuvveti, vurgu süresi, mikroorganizmaların büyüklüğü ve biçimi gibi değişkenlerle araştırmışlardır [1]. Zimmerman ve ark. [3] genetik materyal transferini kolaylaştırmak için vurgulu elektrik alanını kullanmışlardır. Araştırmacılar bu yöntemle hücre zarının yarı geçirgenliğinin geri dönüşümlü bir şekilde arttığını rapor etmişlerdir. Hücre zarının belirli kısımlarındaki geçirgenlik artması; geri dönüşümlü elektriksel bozunma, elektropermabilizasyon veya elektroporasyon gibi isimlerle ifade edilmeye başlanmıştır. Genetik alanında yapılan birçok çalışma hangi vurgulu elektrik alan altında çalışılırsa hücre zarının bozulacağını bulmak için odaklanmıştır [4-7]. Bu alanda oluşturulan bilgiler vurgulu elektrik alanın bir gıda koruma prosesi olarak anlaşılmasına yardımcı olmuş ve PEF teknolojisinin temellerini sağlayıp gıdalarda bakteri inaktivasyonu için kullanılmasının önünü açmıştır. 1980'li yılların başlarında bir araştırma grubu Sale ve Hamilton'un çalışmasını devam ettirerek PEF'e duyarlı birçok bakteri hakkındaki çalışmalarının sonuçlarını yayınlamışlardır. Ayrıca mikroorganizmalar üzerinde PEF'in etkisini tanımlayan, elektrik alan kuvveti ve uygulama süresini kapsayan bir matematiksel ifadeyi geliştirmişlerdir [1]. 1980'li yılların sonuna doğru birçok araştırmacı PEF teknolojisinin bir gıda koruma prosesi olarak kullanılabileceğini anlamış ve buna dayalı çalışmalara başlamıştır. Birçok gıda araştırma grubu ısıtım olmayan koruma veya gelişen yeni gıda koruma teknolojisi olarak bilinen PEF teknolojisini keşfetmeye başlamıştır [8-12]. Aynı yıllarda mikrobiyologlardan, gıda bilimcilerden ve elektrik mühendislerinden oluşan multidisipliner bir grup sürekli rejimle çalışan bir pilot sistemi biçimlendirmiştir. Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) 7 Temmuz 1995'te CoolPure® şirketine akışkan ve pompalanabilir gıdaların antimikrobiyal uygulamalarında kullanılmak üzere endüstriyel düzeyde bir PEF teknolojisinin geliştirilmesi için ilk düzenlemeyi yapmıştır. PEF ile ilgili gelişmeler sonucu bu teknolojinin geleneksel gıda koruma yöntemlerinin tamamlayıcısı veya yerine geçebileceği birçok araştırmacı tarafından dile getirilmeye başlanmıştır. Yirminci yüzyılın sonları ile 21. yüzyılın başlarında laboratuvar ölçeklerden endüstriyel ölçeklere kadar değişen sistemler geliştirilmiştir [13].

PEF TEKNOLOJİSİNİN TEMEL UNSURLARI

Tipik bir PEF ünitesi, yüksek voltajlı bir vurgu jeneratörü, uygulama odacığı, akış kontrol sistemi, kontrol ve monitör aygıtından oluşur (Şekil 1) [1]. Bu bileşenlerin özellikleri modelden modele ve araştırma grupları arasında değişim göstermesine rağmen temel ilkeleri aynıdır.

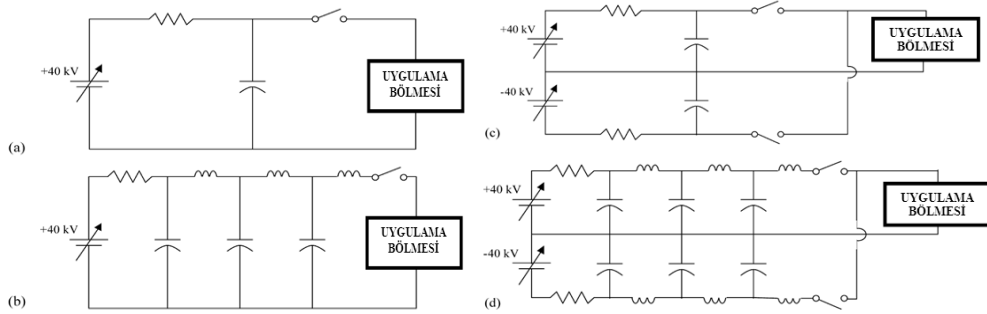


Şekil 1. PEF sisteminin temel bileşenlerinin şematik gösterimi

Yüksek Voltajlı Vurgu Jeneratörü

Yüksek voltajlı vurgu jeneratörü istenen formda, sürede ve yoğunlukta yüksek voltajlı vurguların oluşmasını sağlayan bir sistemdir. Bu sistemin işleyişi üç madde ile özetlenebilir. Bunlar;

1. Bir güç sağlayıcısı ile istenen yoğunlukta yüksek voltajlı direk akımın (DC) üretilmesi,
2. Bir veya grup halinde kapasitörlerde elektrik enerjisinin depolanması,
3. Yüksek voltajlı bir vurgu olarak istenilen karakteristik ve genişlikte üretmek için tasarlanmış bir akım şemasından serbest bırakılmasıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Vurgulu elektrik alan üretmek için kullanılan elektrik devreleri; a) tek kutuplu logaritmik azalan, b) çift kutuplu logaritmik azalan, c) tek kutuplu dikdörtgen ve d) çift kutuplu dikdörtgen [1].

Güç sağlayıcısı elektriği etkili voltaj düzeyinden (genellikle ~ 220 veya 440 V AC) istenilen yüksek voltajlı DC gücüne dönüştürür. PEF teknolojisi için istenilen elektrik düzeyi genellikle 20 ile 60 kV arasındadır. Ayrıca gerekli olan elektrik miktarı tek veya çift kutuplu vurgu üretimi gibi sistemin karakteristik özelliklerine bağlıdır [1].

Uygulama Odacıkları

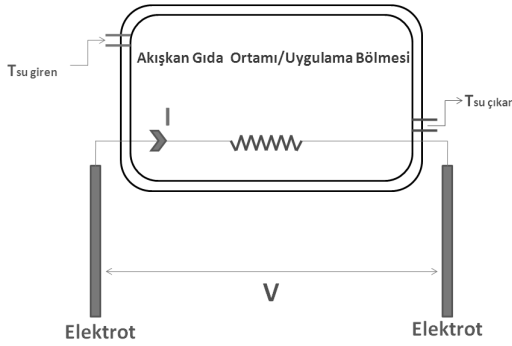
Uygulama odacığı PEF sisteminin temel bileşenlerinden birisidir. Yıllar içinde birçok farklı uygulama odası tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Uygulama odasında bulunan bir çift elektroda, üretilmiş olan yüksek voltajlı vurgular iletilir ve bunun sonucunda uygulama odası içinde bulunan sıvı gıdaya uygulanmak üzere yüksek yoğunlukta elektrik alan üretilmiş olur. Buradaki iki elektrot arasında sıvı gıda belirli bir akış debisi ile geçmektedir. Uygulama odacıkları, sistemde gıda üzerine elektrik akımının uygulandığı donanımlar olarak tanımlanabilir. Buralarda karşılıklı yerleştirilmiş elektrotlar bulunur ve materyal bu elektrotlar arasından geçerken yüksek voltajlı elektrik vurgusuna maruz bırakılır. Bu odacıklar birbirine seri halde bağlanmış durumdadır ve iki odacık arasında aktarımı sağlayan

borular yerleştirilmiştir. Borular soğutulmuş (su içine daldırma vb) fazla ısınma da engellenebilmektedir.

PEF teknolojisi ile yapılan çalışmalar sırasında, zaman içinde pek çok uygulama odacıkları tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Her odacık kullanılacak gıdanın kendine has özelliklerine dayanarak tasarlanmıştır. Bir PEF cihazı düzenlendiğinde; gıdanın özelliği, uygulama odacıklarının tasarımı, uygulama sırasında gıdanın sistemde akış hızı (debisi) ve yüksek voltaj elde etmek için gerekli olan ekipmanlar önem taşımaktadır. Elektrotlar arasındaki boşluk ise uygulama yapılan gıdanın partikül yapısının en az 3 katı olmalıdır. Partikül büyüklüğü 6 mm olan gıdanın PEF teknolojisi ile işlenmesi sırasında 35 kV/cm'lik bir elektrik akım şiddeti elde edebilmek için 18 mm elektrot aralığına ihtiyaç vardır [13, 27, 30].

Uygulama odacıklarının en temel fonksiyonu, elektrik alan uygulanırken işlenen ürünü içermesidir. Bir PEF uygulama odacıkları iletken malzemeden (genellikle paslanmaz çelik) yapılan iki elektrot ve bu elektrotların monte edildiği iletken olmayan maddeden (elektriğe dayanıklı polikarbonat ve diğer plastik polimerler) yapılmış bir haznedir ibarettir. Elektrotlar ayrıca diğer

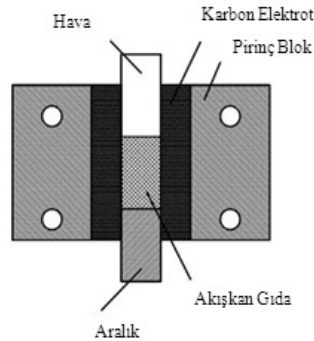
iletken malzemelerden de üretilebilir. Örneğin; grafit, altın veya platin gibi metaller ve iletken polimerler (poliasetilen, polisülfürnitrit gibi) bu amaçla kullanılabilir [14, 15]. Uygulama odacıkları için dikkat edilmesi gereken bir diğer tasarım faktörü ise elektrik direnci sonucu oluşan ısı ve miktardır. Çünkü uygulama odacığına yüksek yoğunlukta elektrik enerjisi verilmekte ve elektrik enerjisi gıdanın elektriği iyi iletememesinden ötürü dirençle karşılaşmaktadır (Şekil 3). Bu dirençle birlikte elektrik enerjisinin büyük bir çoğunluğu ısı enerjisine dönüşmektedir. Uygulama odacığında oluşan bu ısı uzaklaştırılmazsa ısının yıkıcı etkisi gıda bileşimini olumsuz yönde etkilemektedir.



$$Q = V \cdot I \cdot t = m \cdot c \cdot (T_{su \text{ çıkan}} - T_{su \text{ giren}})$$

Şekil 3. Uygulama odasının tasarımında sıcaklığın etkisi (Q: ısı (J); V: voltaj (volt); I: akım (A); t: uygulama süresi (s); m: akışkanın kütlesi (kg); c: akışkanın özgül ısısı ($Jkg^{-1}K^{-1}$); T: sıcaklık (K)) [16]

Bir uygulama odasının sınıflandırılmasında temel fark, kesikli veya sürekli rejimle çalışmasıdır. Kesikli tipteki uygulama odacığı tasarımları deneysel sonuçlara göre modellenen ilk uygulama odacıklarıdır ve katı veya yarı katı ürünlerin işlenmesi için planlanmışlardır. Paralel elektrotlu uygulama odacıkları, kesikli veya diğer adıyla



Şekil 4. U şeklinde biçimlendirilmiş uygulama odacığı [17].

Bir başka uygulama odacığı ise iki adet paslanmaz çelik elektrot kullanılarak tasarlanmıştır. Isı yalıtımı için polisülfan veya fleksiglas kullanılmıştır. Elektrot alanı yaklaşık 27 cm^2 'dir ve elektrotlar arasında 0.50 ile 0.95 cm arasında değişen değerlerde boşluk bırakılmıştır. Bu tasarım 70 kV/cm 'lik elektrik akım uygulamasına

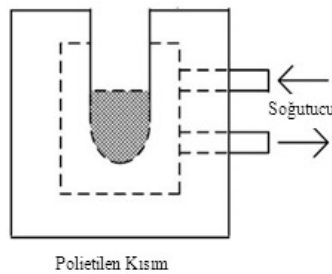
statik uygulama odacıkları için en iyi örnektir. Bu tipteki uygulama odacığı kullanıldığında, uygulanacak her işlem öncesinde ürünün odacığa alınması ve işlem bitiminden sonra ürünün odacıktan boşaltılması gerekmektedir. Bu ise endüstriyel ölçekli proses uygulamalarında elverişsiz bir teknik olup özellikle odacığın uygulama hacminin sınırlı tutulması bir diğer dezavantajıdır [1]. Sürekli uygulama odacıkları ise sıvı veya yarı sıvı ürünlerin akmasına izin verecek bir akışkan yoluna sahiptir. Odacık içinden akışkan gıda yeteri kadar güçlü bir pompa yardımı ile belirli bir debide geçirilebilmektedir. Bu tip odacıklara örnek olarak; eşmerkezli silindir, eşmerkezli koni, bir noktaya yönelen elektrik alan ve eş alanlı uygulama odacıkları verilebilir. Sürekli uygulama odacıkları endüstriyel ölçekli uygulamalar için uygundur ve PEF teknolojisinde kullanılacak odacıklar için yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu sürekli uygulama odacıkları üzerine yoğunlaşmıştır.

Uygulama odacığının tasarımı sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus kıvılcım oluşumudur. Proses sırasından kıvılcım oluşumunun temel nedenleri gıdanın sahip olduğu bileşim, uygulama odacığının geometrik özellikleri ve en önemlisi hava kabarcıkları şeklinde özetlenebilir. Bu istenmeyen durumları önüne geçmek için, uygulama odacığının yuvarlak geometriye sahip elektrotlar içermesine dikkat edilmelidir [1].

Kesikli Rejimle Çalışan Uygulama Odacıkları

U Şeklindeki Uygulama Odacığı

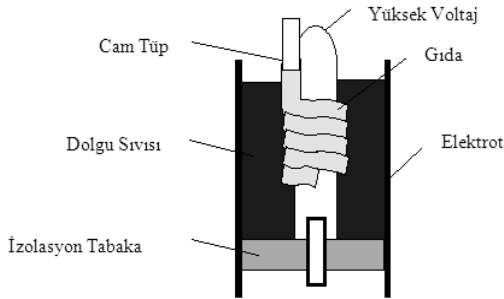
U şeklindeki uygulama odacığı, dıştan içe doğru pirinç bloklar, karbon elektrotlar ve polistiren bölümden oluşur (Şekil 4). Pirinç bloklar işleme tabi tutulan gıdanın kontrol edilmesi ve suyun dolaşımının sağlanması için ceketlerle desteklenmiştir. Model maksimum 30 kV/cm 'lik uygulamaya izin vermektedir. Dikdörtgen vurguların dalga genişliği 2-20 μs arasında ve saniyede 1 vurgu olacak şekilde tasarlanmıştır [17].



uygundur. Sistemde ısınmanın engellenmesi için soğuk su kullanılır, soğuk suyun dolaşımı elektrotlara yerleştirilen ceketlerle sağlanır [13].

Cam Bobinli Uygulama Odacığı

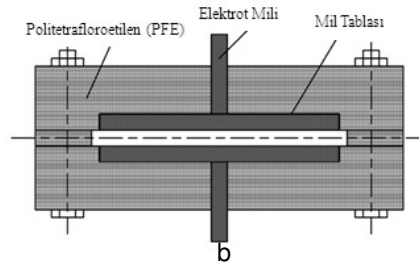
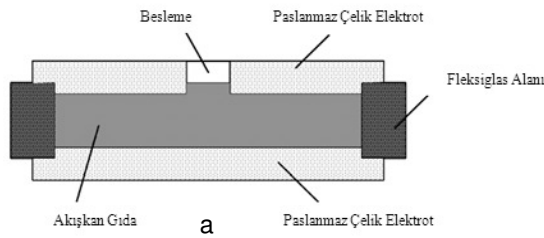
Cam bobinli durağan odacık Lubicki ve Jayaram [18], tarafından tasarlanmış bir modeldir (Şekil 5). Sistemde 23 cm³ hacminde, yüksek iletkenliğe sahip ve dolgu sıvısı ile doldurulmuş bir odacık mevcuttur. Dolgu sıvısının içine yerleştirilen anot, cam bobinle sarılmış durumdadır. Anotta oluşturulan yüksek voltaj, cam bobin içerisinden geçirilen gıdaya uygulanarak inaktivasyon sağlanır. Prosesin verimliliği açısından kullanılan dolgu sıvısının iletkenlik katsayısı çok önemlidir [19].



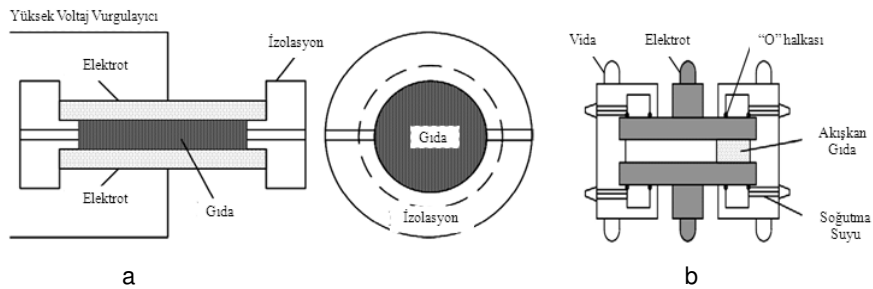
Şekil 5. Cam bobinli statik uygulama odacığı modeli [19].

Paralel Plakalı Statik Uygulama Odacığı

Paralel plakalı uygulama odacığı Dunn ve Pearlman [20] tarafından geliştirilmiştir. Uygulamalar esnasında 25 kV/cm elektrik alanına kadar çıkılabilmektedir. Etkili elektrot alanı 20 cm² olup elektrotlar arasındaki mesafe 5 mm olarak tasarlanmıştır (Şekil 6a).



Şekil 6. Paralel plakalı ve kesikli rejimle çalışan uygulama odacıkları; a) Dunn ve Pearlman [20] tasarımı, b) Zhang [21] tasarımı



Şekil 7. Disk şeklindeki statik uygulama odacıkları; a) Washington State Üniversitesi tasarımı [23], b) Amiali ve ark. [24] tasarımı

Paralel plakalı bir diğer tasarım Zhang [21] tarafından biçimlendirilmiştir. Bu modelde 60x60x3 mm³ uygulama hacmi ve birbirine paralel iki elektrot mevcut olup ısıya ve elektriğe karşı dirençli teflon yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Fakat bu modelin inaktivasyon düzeyi sınırlıdır (Şekil 6b).

Disk Geometrilili Statik Uygulama Odacığı

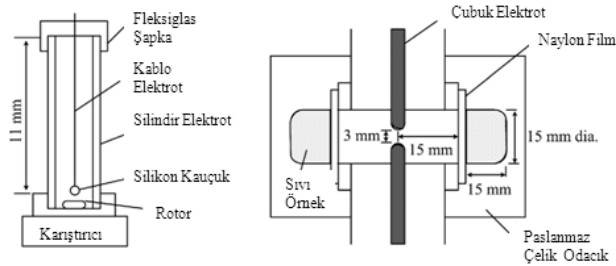
Disk geometrilili tasarımının önemi yüksek elektrik alan kuvvetlerinde kendini göstermektedir. Çünkü yüksek elektrik alan kuvvetlerinde uygulama odacığı elektriksiz yıkıma uğrayarak işlevini etkili gerçekleştirememektedir. Elektriksiz yıkım sonucunda uygulama odacığının gıda ve elektrotlar arasında yalıtımı sağlayan malzemenin yıpranması söz konusu olmakta ve tipik aşınmalar boy göstermektedir. Bu tasarımda bunun önüne geçmek için elektrik alanın en yüksek olduğu bölgelerden yalıtım malzemesi kaldırılmış, yalıtım malzemesinin ebatları arttırılmış, yalıtım malzemesi elektrik alan kuvvetinin göre monte edilmiş ve son olarak özel geometride elektrot tasarlanmıştır [22]. Wahsington State Üniversitesi disk şeklinde kesikli rejimle çalışan bir uygulama odacığı tasarlamıştır (Şekil 7a). Bu dizaynın başlıca özellikleri;

- Uygulamalar esnasında 75 kV/cm elektrik alan kuvvetine kadar çıkılabilmektedir.
- Aşırı ısınmanın önüne soğuk su sirkülasyonu ile geçilebilmektedir.
- Elektrotlar arasındaki mesafe ve uygulama odacıklarının hacmi sırasıyla 0.51 cm ve 13.8 mL veya 0.95 cm ve 25.7 mL'dir
- Etkili elektrot alanı 27 cm²'dir.

Amialı ve ark. [24] geliştirmiş oldukları modelde (Şekil 7b) ise uygulama hacmi 0.23 mL, elektrotlar arası mesafe 0.15 cm ve etkili elektrot alanı 1.53 cm², paslanmaz çelik elektrotlar ve yalıtım malzemesi polipropilen olacak şekilde tasarlamışlardır. Ayrıca aşırı ısınma için ceketlerde entegre edilmiştir.

Çubuk Şeklinde Silindirik Elektrotlu Statik Uygulama Odacıkları

PEF uygulamalarının etkinliğini geliştirmek için Matsumoto ve ark. [10] tarafından geliştirilen modellerdir (Şekil 8). Elektrotları silindirik çubuklar şeklinde tasarlamış ve teflonla kaplamışlardır.



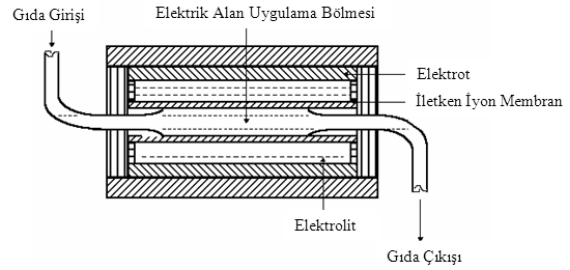
Şekil 8. Çubuk silindirik şeklindeki statik uygulama odacıkları

Sürekli Rejimle Çalışan Uygulama Odacıkları

Gıda ve Elektrodu Ayırmada İletken İyon Membran Kullanılan Odacıklar

İletken iyon membran kullanılan bu tasarımında, birbirine paralel yerleştirilmiş tabaka şeklinde iki elektrot ve iletken iyon membranlar kullanılmaktadır. Elektrotlar gıdadan, sulfonat polistiren ve akrilik asit kopolimerlerinden yapılmış iletken membran yardımıyla ayrılmaktadır. Elektrotlar ile iyon membran arasında

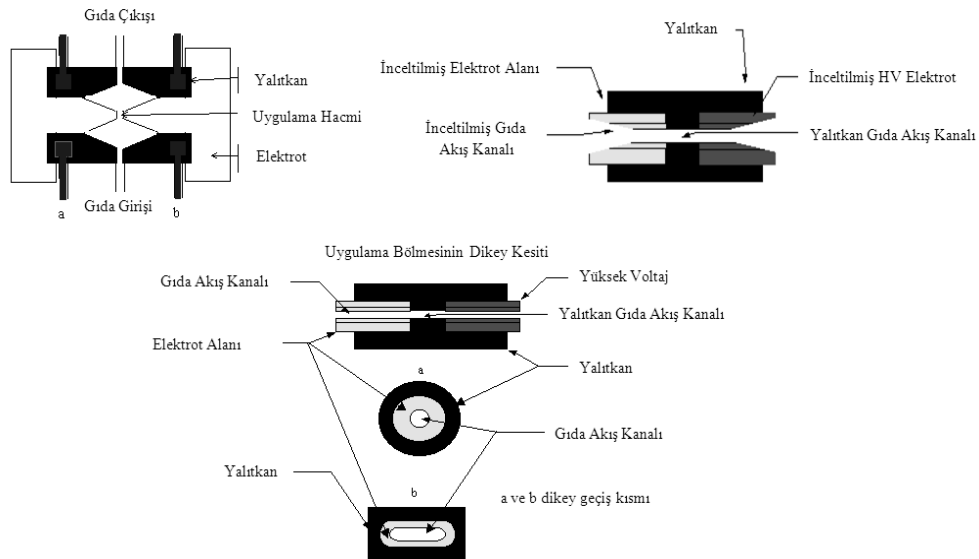
elektrik akımı iletimini kolaylaştırmak için elektrolit kullanılmıştır [20]. Dunn ve Pearlman [20] tarafından geliştirilen modelde, tabaka şeklinde elektrotlar yerine hazneler şeklinde elektrotlar kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Gıda ve elektrodu ayırmada iletken iyon membran kullanılan odacık modeli

Sürekli Ortak Alanlı Akı Uygulama Odacığı

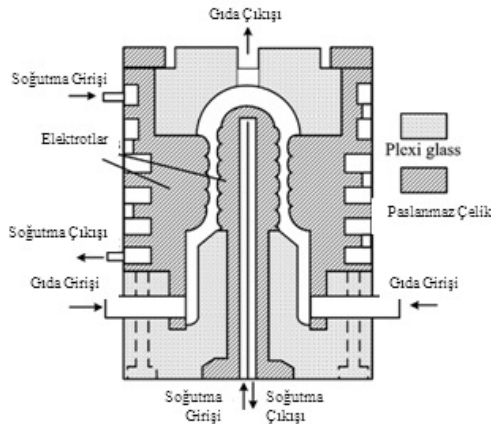
Yin ve ark. [25], PEF uygulama odacıklarında işlem sürekliliğinin geliştirilmesi amacıyla ivmelendirilmiş (accelerated) elektrik akımı kavramını uygulamaya koymuşlardır. Buradan yola çıkarak Şekil 10'da gösterilen modeli geliştirmişlerdir. Bu sistemde uygulama odacığı gaz birikimini engellemek amacıyla konik şeklinde tasarlanmıştır. Bu sayede elektrotta meydana gelebilecek kıvılcımlanmanın önüne geçilmiştir. Konik bölge, uygulama odacığından geçen voltaj ile sisteme verilen voltajın hemen hemen eşit olacağı şekilde tasarlanmıştır. 25-40 kV/cm elektrik alan kuvvetlerinde uygulama gerçekleştirme özelliğine sahiptir. Bu tip uygulama odacığı düzeneklerinde birinci elektrot akış ünitesi, izolatör ünitesi, ikinci elektrot akış ünitesi, iletken ve yalıtkan giriş elemanları bulunur. Elektrot akış ünitesi ve yalıtkan ünitesi tek bir tüp içerisinde ve tek bir ekipman gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 10. Sürekli ortak alanlı akı uygulama odacığı ve farklı modelleri [19, 26]

Eş Merkezli (Eksendeş) Uygulama Odacığı

İç içe geçirilmiş silindir şeklinde iki elektrottan oluşan bu model de gıda iki elektrot arasından geçirilerek elektrik akımına maruz bırakılır. Dıştaki elektrot hem uygulama odacığındaki elektrik alanı hem de diğer bölümlerindeki elektrik alan yoğunluğunun artırılmasını sağlar. Elektrotların konfigürasyonu PEF uygulamalarında büyük önem taşıyan elektrik akım ölçümünün optimum koşullarda yapılmasını sağlayacak şekilde dizayn edilmelidir. Elektrotların en uygun şekilde tasarlanmış olması elektrik alan şiddetindeki artışların da kararlı olmasını sağlamaktadır. Koaksial uygulama odacığı modeli ile yapılan çalışmalar, sıvı gıdalarda (süt, meyve suları ve sıvı yumurta) patojen ve patojen olmayan bakterilerin, küflerin, mayaların ve enzimlerin inaktivasyonunun başarıyla sonuçlandığını göstermiştir (Şekil 11) [13].



Şekil 11. Eş merkezli ve sürekli rejimle çalışan uygulama odacığı [27]

Bu tasarıma ilişkin genel özellikler özetlenecek olursa;

- Tasarımda, iç içe girmiş iki elektrot mevcuttur,
- Her iki elektrodun aşırı ısınması soğutma sistemiyle giderilmektedir,
- Elektrotlar arasındaki boşluk 2-6 mm arasındadır ve dakikada 1-2 litrelik akış debisine sahiptir,
- 70 kV/cm' lik elektrik alanına kolayca ulaşılmaktadır.

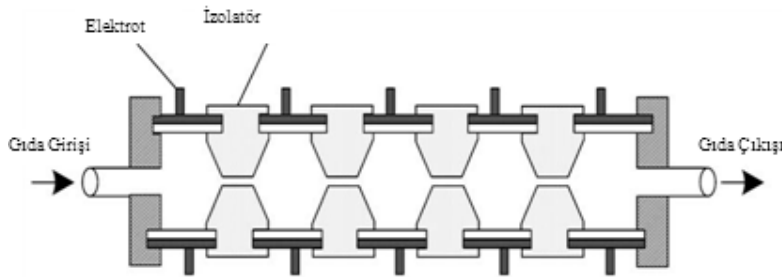
Elektrot Rezervuar Hazneli Sürekli Uygulama Odacığı

Bu model Dunn ve Peralman [20] tarafından tanımlanmıştır. Hazneli uygulama odacığı ile 5-25 kV/cm elektrik alan kuvveti arasında kare veya logaritmik azalan vurguların 1-100 ms vurgu genişlikleri arasında çalışmayı olanaklı kılmaktadır. Silindir biçiminde elektrotlar kullanılmıştır (Şekil 12). Bu modelin en büyük dezavantajı uygulama esnasında kıvılcım oluşumudur [28].

Sürekli Rejimle Çalışan Diğer Uygulama Odacıkları

Matsumoto ve ark. [10] daha yüksek elektrik alan kuvvetine çıkabilmek için uygulama odacıklarının hacmini küçültmüştür. Ayrıca uygulama odacığının bir noktasından gıdanın geçmesini koşullayarak yoğunlaştırılmış elektrik alan tesiri altında kalmasını sağlamıştır. Bu tasarım paralel disk elektrotlara sahip olup; teflon malzeme ile yalıtılmıştır. Elektrotlar arasındaki mesafe 20 mm olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 13a).

Alkhafaji ve Farid [29], aynı şekilde elektrik alan kuvvetinin bir noktada yoğunlaştığı farklı bir modeli önermişlerdir (Şekil 13b). Bu model paslanmaz çelik iki elektrottan oluşmakta olup, uygulama hacmi sadece 0.06 cm³ ve 2.5 cm³/s debide çalışmaya izin vermektedir. Bu ilke ile tasarlanan modellerin en büyük sorunu aşırı ısınmalardır [28].

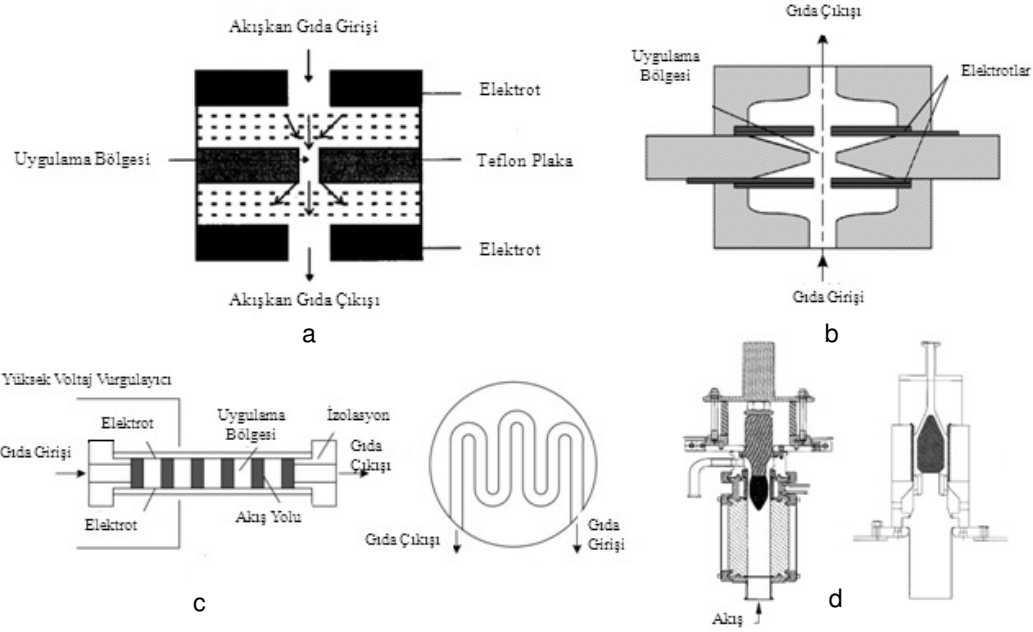


Şekil 12. Hazneli ve sürekli rejimle çalışan uygulama odacığı

Washington State Üniversitesi PEF araştırma grubu paralel plakalı kesikli sistemin ilkelerini temel alan sürekli rejimle çalışan bir model geliştirmiştir. Bu modelin en temel katkısı ürünün uygulama odacığında kalış süresini arttırmasıdır (Şekil 13c). Model soğutma ceketlerine sahip olup soğutma su ile yapılmaktadır. Elektrotların yapıldığı malzeme paslanmaz çeliktir. Operasyon koşulları uygulama hacmi 8-20 cm³ arası, elektrotlar arası mesafe 0.51-0.95 cm, elektrik alan

kuvveti uygulaması 35-70 kV/cm, vurgu genişliği 15 µs ve akış debisi 600-1200 cm³/dk şeklindedir [31].

Mcdonald ve ark. [31] pilot ölçekli model bir sistemi biçimlendirirken hem ürünü işlem öncesi uygulama sıcaklığına getiren hem de işlem sonrası hızlıca soğutan bir uygulama odacığı geliştirmişlerdir (Şekil 13d). Bu sistem ticari ölçekte ısı-elektrik enerjisinin kombine ederek ürünü işleme özelliğine de sahiptir.



Şekil 13. Sürekli rejimle çalışan bazı uygulama odacıkları; a) Matsumoto ve ark. [10], b) Alkhafaji ve Farid [29], c) Zhang ve ark. [30], d) Mcdonald ve ark. [31]

Ürün Akışını Sağlayan Sistemler

Sürekli bir rejim ile çalışan PEF sistemleri, sıvı veya yarı sıvı gıda ürünlerini ham ürün tankından işlem görmüş ürün tankına kadar taşımak için uygun ekipmanlarla donatılmıştır. Bu ekipmanlar başlıca taşıyıcı borular ile pompalardır. Plastik borular elektriksel nedenlerden dolayı birkaç alanda kullanılmasına rağmen, temizlik açısından paslanmaz çelik borular tercih edilir. Pompa ve boru hatlarından akan sıvı aynı zamanda elektrik akımı da barındırmaktadır. Bu durum iş güvenliği açısından sıkıntı yaratabilir. Bu nedenle sistem topraklanmalıdır. Ayrıca akışın istenilen yere yönlendirilmesi için boru hatlarının çeşitli noktalarında valf ve baypas hatları olmalıdır. Yerinde temizlik (CIP) veya yerinde sterilizasyon (SIP) sistemleri PEF sisteminde çoktan yerini almıştır. Isı değiştiriciler uygulama odacığının girişinde ve çıkışında ürünün sıcaklığını istenilen değerde tutmak için kullanılmaktadır. İşlem sonrası sistemden çıkan steril gıdanın tekrar kontamine olmaması için aseptik paketleme prensibi benimsenmektedir [1, 32].

Kontrol ve İzleme Donanımları

PEF sistemleri merkezi bir bilgisayara bağlı olup bu bilgisayar aracılığı ile yüksek voltajlı vurgu jeneratörü, uygun koşullara ayarlı voltaj ve vurgu frekansı ve ayrıca sistemin içinde bulunan pompa ve elektrik devresinin kontrolü sağlanmış olmaktadır. Bu bilgisayar ayrıca sistemin çalışır durumda iken farklı noktalarındaki sıcaklığını, ürünün akış hızını, voltajını, akımını ve uygulanmış vurguların güç eğrilerini kayıt altına tutmaktadır [33, 34].

SONUÇ

Vurgulu elektrik alan (PEF) teknolojisi gıda kökenli patojen mikroorganizmaları yok etmek ve gıdayı bozan mikroorganizmaları kontrol altına almak için elektrik alanı kullanımını temel alan, ısı olmayan ve gıda kalitesine olumsuz yönde etki etmeyen bir gıda koruma prosesidir. Tipik bir PEF ünitesi, yüksek voltajlı bir vurgu jeneratörü, uygulama odacığı, akış kontrol sistemi, kontrol ve monitör aygıtından oluşur. Bunlardan en önemlisi uygulama odacığı olup tasarımı sırasında titiz davranılmalıdır. PEF teknolojisinin gıda koruma amaçlı kullanımı üzerine yapılan ve devam eden çalışmalar göstermektedir ki; vurgu üretiminde kullanılan yarı iletkenlerin daha iyi ve daha ucuz geliştirilmesi, resmi yasaların çıkartılması ve PEF teknolojisinin maliyetinin azaltılması ile bu teknolojinin ticari işlemler ve sıvı gıdaların korunmasında yakın gelecekte başarılı sonuçlar alması kuşkusuz olacaktır.

PEF teknolojisinin akışkan gıdalarda (özellikle meyve suyu, süt gibi) gösterdiği başarılı sonuçlar dikkate değer olup yüksek kapasiteli sistemlerin üretilmesinin önünü açmıştır. Yakın gelecekte gelişmiş ülkelerde PEF teknolojisi ile sıvı ve yarı sıvı gıdaların işlenerek yüksek kalitede ürünler elde edileceği bilinmektedir. Bu bağlamda uluslararası gıda ticaretinin rekabetinde meydana gelecek konjüktürel değişimler sonucu ülkemizin bu gelişmeleri takip etmesi kaçınılmaz olacaktır. Bu amaçla gereksinim duyulacak PEF teknolojisinin ülkemizde de üretilmesi konusunda diğer disiplinlerinde (Makine, Endüstri, Elektrik-Elektronik, Malzeme ve Gıda Mühendisliği gibi) dikkati çekilmelidir. Bu teknolojiye dünya çapında geçiş olduğunda yerli üreticinin bu teknolojiyi satın alması ve bunun sonucunda dış kaynaklara yoğun bir şekilde döviz aktarılması kaçınılmaz olacaktır. PEF teknolojisine dair

çalışmaların başlatılması, sanayiye bu teknolojinin iletilmesi ve yaygınlaştırılması, teknolojinin yerli sanayi tarafından üretilmesine olanak sağlanmış olacaktır. Literatürlerde PEF sistemi ile işleme maliyetinin yüksek olmadığı ve litre başına 0.02 dolar üretim maliyetinin olduğu bildirilmiştir. Kullanılan enerjinin temini, sürekliliği ve çevre dostu oluşu ayrıca bu teknolojinin üstünlükleri arasındadır. Aynı zamanda işlem süresinin de mikrosaniye ölçeğinde gerçekleştirilebilmesi oldukça dikkat çekicidir.

KAYNAKLAR

- [1] Barbosa-Cánovas, G.V., David, S., 2005. Present Status and the Future of PEF Technology. Novel Food Processing. Edited by Barbosa-Cánovas, G.V., Tapia, M.S., Cano, M.P. First edition, USA: CRC Press, 1-36p.
- [2] Heinz, V., Knorr, D., 2001. Developments in pulsed electric field (PEF) processing-European HELP project. Proceedings of International Seminar on Electric Field Processing-The Potential to Make a Difference, Gloucestershire, UK.
- [3] Zimmermann, U., Pilwat, G., Riemann, F., 1974. Dielectric breakdown of cell membranes. *Biophysical Journal* 14: 881-899.
- [4] Tsong, T., 1990. Review on electroporation of cell membranes and some related phenomena. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 24: 271-295.
- [5] Tsong, T., 1991. Electroporation of cell membranes. *Biophysical Journal* 60: 297-306.
- [6] Weaver, J., Barnett, A., 1992. Progress Toward a Theoretical Model For Electroporation Mechanism: Membrane Electrical Behavior and Molecular Transport. In Guide to Electroporation and Electrofusion; Edited by Chang, D., Chassy, B., Saunders, J., Sowers, A.. Academic Press, California, 91-118p.
- [7] Ho, S., Mittal, G., 1996. Electroporation of cell membranes: a review. *Critical Reviews in Biotechnology* 16(4): 349-362.
- [8] Palaniappan, S., Sastry, S., 1990. Effects of electricity on microorganisms: a review. *Journal of Food Processing and Preservation* 14: 393-414.
- [9] Jayaram, S., Castle, G., Margaritis, A., 1992. Kinetics of sterilization of *Lactobacillus brevis* by the application of high voltage pulses. *Biotechnology and Bioengineering* 40: 1412-1420.
- [10] Matsumoto, Y., Shioji, N., Satake, T., Sakuma, A., 1991. Inactivation of microorganisms by pulsed high voltage application. Industry Applications Society Annual Meeting, 652-659p.
- [11] Grahl, T., Sitzmann, W., Markl, H., 1992. Killing of Microorganisms in Fluid Media by High Voltage Pulses. Presented at the 10th DECHEMA Biotechnology Conference Series, Frankfurt, Germany, 5B, 675-678p.
- [12] Mertens, B., Knorr, D., 1992. Developments of nonthermal processes for food preservation. *Food Technology* May: 124-133.
- [13] Barbosa-Cánovas, G., Gongora-Nieto, M., Pothakamury, U., Swanson, B., 1999. Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields, San Diego, CA, Academic Press.
- [14] Bushnell, A., Clark, R., Dunn, J., Lloyd, S., 1996. Process for Reducing Levels of Microorganisms in Pumpable Food Products Using a High Pulsed Voltage System. US Patent 5,514,391.
- [15] Qin, B., Barbosa-Cánovas, G., Pedrow, P., Olsen, R., Swanson, B., Zhang, Q., 1997. Continuous Flow Electrical Treatment of Flowable Food Products. US Patent 5,662,031.
- [16] Ağçam, E., 2011. Vurgulu Elektrik Alan ve Isıl Isıl İşlem Uygulamalarının Portakal Suyunun Özellikleri ve Raf Ömrü Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- [17] Sale, A., Hamilton, W., 1967. Effect of high electric fields on microorganisms. I. Killing of bacteria and yeast. *Biochimica et Biophysica Acta* 148: 781-788.
- [18] Lubicki, P., Jayaram, S., 1997. High voltage pulse application for the destruction of the Gram-negative bacterium *Yersinia enterocolitica*. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 43: 135-141.
- [19] Anonim, 2000. Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies Pulsed Electric Fields. U. S. Food and Drug Administration Center for Food Safety and Applied Nutrition June 2.
- [20] Dunn, J., Pearlman, J., 1987. Methods and Apparatus for Extending the Shelf Life of Fluid Food Products. US Patent 4,695,472.
- [21] Zhang, X.H., 2005. Pulsed Electric Fields Sterilization Mechanism and Experimental Equipment Research. The Engineering College of the Northeast Agricultural University, Harbin.
- [22] Bushnell, A.H., Dunn, J.E., Clark, R.W., Pearlman, J.S., 1993. High Pulsed Voltage Systems for Extending the Shelf Life of Pumpable Food Products. US Patent 5,235,905.
- [23] Qin, B.L., Zhang, Q.H., Barbosa-Cánovas, G.V., Swanson, B.G., Pedrow, P.D., 1994. Inactivation of microorganism by pulsed electric fields of different voltage waveforms. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 1(6): 1047-1057.
- [24] Amiali, M., Ngadi, M.O., Raghavan, V.G.S., Smith, J.P., 2004. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in liquid dialyzed egg using pulsed electric fields. *Food and Bioprocess Processing* 82(C2): 151-156.
- [25] Yin, Y.G., Zhang, Q.H., Sastry, S.K., 1997. High Voltage Pulsed Electric Field Treatment Chamber for the Preservation of Liquid Food Products. US Patent 5,690,978.
- [26] Sensoy, I., Zhang, Q.H., Sastry, S.K., 1997. Inactivation Kinetics of *Salmonella* Dublin by Pulsed Electric Field. *Journal of Food Process Engineering* 20(5): 367-381.
- [27] Qin, B.L., Barbosa-Cánovas, G.V., Swanson, B.G., Pedrow, P.D., Olsen, R.G., Zhang, Q.H., 2000. Continuous Flow Electrical Treatment of Flowable Food Products. US Patent 6,019,031.
- [28] Huang, K., Wang, J., 2009. Designs of pulsed electric fields treatment chambers for liquid foods

- pasteurization process: a review. *Journal of Food Engineering* 95(2): 227-239.
- [29] Alkhafaji, S.R., Farid, M., 2007. An investigation on pulsed electric fields technology using new treatment chamber design. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 8(2): 205–212.
- [30] Zhang, Q.H., Barbosa-Cánovas, G.V., Swanson, B.G., 1995. Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *Journal of Food Engineering* 25(2): 261–281.
- [31] McDonald, C.J., Lloyd, S.W., Vitale, M.A., Petersson, K., Innings, F., 2000. Effects of pulsed electric fields on microorganisms in orange juice using electric field strengths of 30 and 50 kV/cm. *Journal of Food Science* 65(6): 984–989.
- [32] Zhang, Q., Qiu, X., Sharma, S., 1997. Recent Developments in Pulsed Electric Processing. In *New Technologies Yearbook*, Edited by Chandarana, D., National Food Processors Association: Washington, DC, 31–42p.
- [33] EPRI, 1998. Pulsed Electric Field Processing in the Food Industry: A Status Report on PEF. Report CR-109742; Palo Alto, CA: Industrial and Agricultural Technologies and Services.
- [34] Kempkes, M., Zhang, Q., Gaudreau, M., Hawkey, T., 2001. Scalable, solid state pulsed power systems for pulsed electric field (PEF) processing of pumpable foods. Institute of Food Technologists, Annual Meeting: Book of Abstracts, Paper 59H-26.
-