



**OHMİK ISITMA ÖRNEKLEME VE
MODELLEME**

Buket DİNÇ

Yüksek Lisans Tezi

Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2021

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

OHMİK ISITMA ÖRNEKLEME VE MODELLEME
(Ohmic Heating Sampling and Modeling)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Buket DİNÇ

Danışman: Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

Erzurum
Ağustos 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Buket DİNÇ tarafından hazırlanan “Ohmik Isıtma Örnekleme ve Modelleme” başlıklı çalışması 03 / 08 / 2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Makinaları Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı / Danışman: Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Ömer ÇOBAN
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Ahmet DURLU
Erzurum Teknik Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Unvan Ad SOYAD

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK danışmanlığında sunulan “Ohmik Isıtma Örnekleme ve Modelleme” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	16	30
Kuramsal Temeller	28	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Bulgular	0	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	15	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Buket DİNÇ	Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK
29.6.2021	29.6.2021
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir

TEŞEKKÜR

Sunduğum bu Y¼ksek Lisans Tez alıŐması, Atat¼rk ¼niversitesi Fen Bilimleri Enstit¼s¼ Elektrik - Elektronik M¼hendisliđi Anabilim Dalı Elektrik Makineleri Bilim Dalında hazırlanmıŐtır.

Tez çalıŐmam s¼resince her zaman yanımda olduğunu hissettirip desteklerini esirgemeyen, tecr¼be ve bilgi birikimlerini benimle paylaŐan danışman hocam Sayın Prof. Dr. K¼ksal ERENT¼RK'e teŐekk¼rlerimi sunarım.

Elektrik Elektronik M¼hendisliđi B¼l¼m¼nde g¼rev yapan ¼đretim ¼yesi hocalarıma teŐekk¼r ederim.

Her zaman yanımda olan, her t¼rl¼ desteği veren değerli aileme, sevgili eŐime ve kızıma teŐekk¼r ederim.

Buket DİN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ OHMİK ISITMA ÖRNEKLEME VE MODELLEME

Buket DİNÇ

Danışman: Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

Amaç: Bu çalışmada ohmik ısıtma işlemlerini tanıtarak, uygulama alanlarını, çalışma prensibini ve modellemesi ile bu sistemin avantajları ve dezavantajları üzerine bir inceleme yapmak amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışma MATLAB/Simulink kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. PID denetleyicilerin parametreleri Ziegler Nichols Yöntemi ve deneme yanılma yöntemi ile bulunmuştur.

Bulgular: Ohmik ısıtıcı için tasarlanan PID denetleyicinin parametreleri olan K_p, K_i, K_d değerleri Ziegler Nichols Yöntemi ile optimize edilerek basamak fonksiyonunun çıkış değişim grafiği elde edilmiştir. Aynı zamanda optimize edilmemiş değerler kullanılarak basamak fonksiyonunun değişim grafiği de tespit edilmiştir.

Sonuç: Optimize edilmiş ve uygulanmış PID denetleyici ohmik ısıtma sistemine uygulandığında referans değerleri anlık olarak değiştirilerek sistemin dinamik performansı incelenmiştir. Sistemin anlık olarak değişen referans değerlerine göre göstermiş olduğu tepkilerde aşım gerçekleşmiş ve belli bir sürede en büyük yükselme zamanını göstermiştir. Sistem kararlı hale geldikten sonra karşılaşılan en büyük yükselme zamanı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ohmik ısıtma, Simülasyon, PID denetleyici

Ağustos 2021, 53 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

OHMIC HEATING SAMPLING AND MODELING

Buket DİNÇ

Supervisor: Prof. Dr. Köksal ERENTÜRK

Purpose: The purpose of this study is to introduce ohmic heating processes and to examine the application areas, working principle and modeling, as well as advantages and disadvantages of this system.

Method: This study was simulated through MATLAB/Simulink. The parameters of PID controllers were developed by Ziegler Nichols Method and trial and error method.

Results: The K_p , K_i , K_d values, which are the parameters of the PID controller designed for the ohmic heater, were optimized with the Ziegler Nichols Method and the output variation graph of the step function was obtained. The change graph of the step function was also determined using non-optimized values.

Conclusion: When the optimized and implemented PID controller is applied to the ohmic heating system, the dynamic performance of the system is examined by changing the reference values instantly. The study revealed that the response of the system based on the instantaneously changing reference values was exceeded and showed the greatest rise time in a certain period of time. After the system stabilized, the maximum rise time was observed.

Keywords: Ohmic heating, Simulation, PID controller

August 2021, 53 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
GİRİŞ.....	1
Ohmik Isıtmanın Prensibi	2
Tarihçe.....	2
Ohmik Isıtmanın Avantajları ve Dezavantajları	4
KURAMSAL TEMELLER.....	7
MATERYAL METOD.....	14
Ohmik Isıtma.....	14
Ohmik Isıtma Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Faktörler	15
Prensipler	21
Matematiksel Modelleme.....	24
Ohmik Isıtma Sistemi İçin Kontrolcü Tasarımı	28
ARAŞTIRMA BULGULARI	33
SONUÇLAR.....	37
KAYNAKLAR.....	38
ÖZGEÇMİŞ.....	43

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Ohmik Isıtma ile Diğer Isıtma Yöntemlerinin Karşılaştırılması	6
Tablo 2. Gıda İşlemede Kullanılan Parametrelerin Tipik Değerleri ve Aralıkları	25
Tablo 3. Ziegler Nichols Metodu İle Parametre Değerleri	32



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Ohmik ısıtma deney düzeneği.....	14
Şekil 2. Şematik diyagram ohmik ısıtma prensibini göstermektedir.	22
Şekil 3. Ohmik ısıtma sistemlerinde elektrot tipleri.....	23
Şekil 4. Ohmik ısıtma sistemlerinde elektrot yerleşim şekilleri.....	23
Şekil 5. Ohmik ısıtma sistemlerinde elektrot yerleşim düzenekleri.....	24
Şekil 6. DC akım kontrol döngüsünün basitleştirilmiş analitik modeli	28
Şekil 7. Sistemde kullanılan 3 fazlı köprü doğrultucu	29
Şekil 8. İleri beslemeli düzeltme. Kompanzasyonsuz (üst kısım) ve kompanzasyonlu (alt kısım) simülasyon şeması.....	30
Şekil 9. Basitleştirilmiş güç kontrol döngüsü MATLAB/Simulink modeli.....	31
Şekil 10. Girişteki 5kW'lık basamak fonksiyonunun çıkıştaki değişim grafiği	33
Şekil 11. Girişteki 5kW'lık basamak fonksiyonuna ve $K_p= 400$ $K_i= 350$ $K_d=100$ değerlerine karşılık sistemin çıkış cevabı	34
Şekil 12. Zamanla referans değerinin değiştirilmesi için kullanılan simulink modeli.....	34
Şekil 13. Sistemde kullanılan PID denetleyici	35
Şekil 14. Referans değişikliğine karşılık dinamik sistem davranışının gözlemlendiği sistem.....	35
Şekil 15. Zamanla değiştirilen referans değerlere karşılık sistemin tepkesi	35
Şekil 16. Ziegler Nichols metodu ve deneme yanılma yöntemi.....	36

GİRİŞ

Gıdaların ısıtma işlemleriyle korunmasındaki asıl amaç gıdanın besin değeriindeki kaybını en aza indirmek ve gıda kalitesindeki bozulmayı önlemektir. Aynı zamanda ürünlerin mikrobiyolojik ve toksikolojik bakımından güvenilir olmasına imkan sağlamaktır.

Son zamanlarda birçok alternatif ısıtma yöntemlerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Bu yöntemlerin arasında üzerinde en çok çalışma yapılan elektriksel yöntemlerin kullanımındadır. Buna paralel olarak bu alanda yapılan araştırmaların hız kazandığı bir gerçektir. Dolayısıyla önümüzdeki yıllarda bu yöntemin kullanımının sıklıkla görülmesi mümkündür. Ohmik ısıtma bu elektriksel yöntemlere bir örnek olarak verilebilir.

Ohmik ısıtma, son 20 yılda ortaya çıkan alternatif gıda ürününü işleme tekniklerinden biridir. Ohmik elektriksel işleme yöntemi, hızlı ve homojen bir şekilde ısıtma sağlar. Bunun yanı sıra az atık ve düşük maliyetle tüm dünyada önem kazanmış minimal işleme yöntemidir. Ohmik ısıtma, sistemden elektriksel alternatif akım geçirilirken, devreyi tamamlayan bir parça olan gıdanın elektriksel dirence bağlı olarak, diğer bir deyişle; gıdaya direkt olarak elektrotların teması ile ısıtılması ilkesine dayanan elektriksel ısıtma tekniğidir (Varghese vd 2014).

Gıda maddesinin içerisinde elektrik akımına karşı göstermiş olduğu bir direnç bulunur. Bu durum gıdanın içerisinde ısı jenerasyonuna sebep olur. Böylelikle elektriksel enerji ısı enerjisine dönüşür. En az iki adet elektrot bir araya gelerek elektrik alanı oluşturur. Bu alan içerisinde ısıtılacak gıdalar doğrudan elektrotlarla temas halindedir, elektrotlardan geçen akıma karşı bir direnç oluştururlar ve oluşturdukları direnç kadar gıdalarda ısınma görülür. Böylelikle homojen ısı jenerasyonu meydana gelir ve bu da sıvı gıdalarda homojen sıcaklık dağılımına neden olur. Gıda maddesinden geçen akıma bağlı olarak hızlı bir ısıtma gerçekleşir.

Bu işlem sayesinde iç enerji formu olarak ısı enerjisi ortaya çıkarılmıştır. Bu nedenle ohmik ısıtma, bazen “Joule ısıtma”, “Elektriksel Direnç Isıtma”, “Direkt Elektriksel Direnç Isıtma”, “Elektro ısıtma” veya “Elektro İletken Isıtma” gibi isimlerle de adlandırılır.

Ohmik ısıtma veya diğer bir deyişle Joule ısıtma, mikrobiyolojik olarak güvenli ve yüksek kaliteli gıdalar sağlayarak gıdalarda hızlı ve homojen bir ısıtma elde etmek için muazzam bir potansiyele sahiptir. Ohmik ısıtmada enerji doğrudan yiyeceğe dağıtılır. Ohmik ısıtmanın başarısı, sistemdeki ısı üretim hızına, yiyeceğin elektriksel iletkenliğine, elektrik alan gücüne, kalış süresine ve gıdanın sistemden akma yöntemine bağlıdır (Halden vd 1990; Imai vd 1995; Takhistov 2007). Elektriksel iletkenlik, etkili bir ohmik ısıtıcının tasarımında önemli

bir parametredir. Sistem tasarımını geliştirmek ve bu teknolojinin ambalajlı gıdalar ve uzun süre dayanabilen paketlenmiş hazır gıda (uzay gıda) ürünü geliştirme alanındaki performansını en üst düzeye çıkarmak ve gıda özelliklerini anlamak için çok fazla çalışma gerekmektedir (Varghese vd 2014). Ohmik ısıtma, partikül ve protein açısından zengin gıdaların işlenmesi için uygundur.

Ohmik Isıtmanın Prensibi

Ohmik ısıtmanın dayandığı prensip, gıda maddesi ile temas halinde olan elektrotlardan alternatif akım geçirilmesi ve iletkenlik özelliğine sahip olan gıda maddesinin direnç olarak kullanılmasıdır.

Ohmik ısıtmanın mantığı bir hayli basittir. Temel olarak ohm yasasına dayanırken, bu yöntemle üretilen ısı enerjisi ise Joule yasasına dayanır. Joule yasası, bir iletkenden akan elektrik akımıyla, bu akımın ürettiği ısı enerjisi arasındaki bağlantıyı gösterir ve Joule etkisi olarak isimlendirilir. Joule Kanunu, direnç ile elektrik akımının karesinin çarpımına eşit olması ile formüle edilir.

Bunun yanı sıra katı gıdalar üzerine ohmik ısıtmanın etkisinin araştırıldığı az sayıda çalışma bulunmaktadır. Ohmik ısıtma sıvı gıdalarda yeterli literatüre sahip olduğu kadar katı gıdalarda yasal kullanımı sağlayacak kadar literatüre sahip değildir.

Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) ve benzeri kuruluşlar, ohmik ısıtma gibi günümüzde sıklıkla kullanılan elektriksel yöntemler konusunda çalışmaların artması için teşvik edici yönlendirmelerde bulunmakta, aynı zamanda bu yöntemlerin ticari üretimde kullanımlarına izin verilmesi amacıyla, bilimsel çalışmalardan elde edilecek verilerin önemli katkı sağlayacağının altını çizmektedirler.

Ohmik ısıtmada işlemin etkinliğini belirleyen faktörler şunlardır;

- gıdanın elektriksel iletkenliği ve bunun sıcaklığa bağlı olarak değişimi,
- ısıtma sisteminin dizaynı,
- gıdanın termofiziksel özellikleri,
- elektriksel alan şiddeti,
- uygulama süresi
- ve içsel sıvı hareketidir.

Tarihçe

Gıda işlemede ohmik ısıtma teknolojisi uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ohmik ısıtma teknolojisi ilk kez 19. yy.'da gıdaların renginin açılmasında, pastörize ve sterilize edilmesinde,

katı gıdaların ısıtılmasında ve aynı zamanda donmuş gıdaların çözünmesinde kullanılmıştır. Bu ısıtma yöntemi 20. yy.'ın başlarında 'Elektro-pure' olarak isimlendirilmiştir ve süt pastörizasyonunda ticari anlamda başarılı ohmik ısıtma teknikleri geliştirilmiştir (Fadl ve Shuli 2014).

20. yy.'ın ortalarına doğru çalışır durumda çok sayıda elektrikli sterilizasyon ünitesi bulunmaktaydı ve tüm dünyada hizmet ettiği tüketici sayısı yüksek bir rakama ulaşmıştı. Bunun yanı sıra kontrol ekipmalarının azlığı ve elektrot materyallerinin eksikliği gibi dezavantajlar nedeniyle bu teknoloji yeterince yaygın hale gelememiştir. O tarihlerde petrol ve doğalgazdan elde edilen enerji üretiminin maliyeti daha ekonomik olduğu için ohmik ısıtma bu kaynaklarda elde edilen enerjinin gerisinde kaldı. Bu sebeple gıda teknolojisinde beklenen başarılı uygulamaların geç kaldığı görülmektedir.

Ohmik ısıtma 20. yy.'ın sonlarına doğru oldukça yaygınlaşmıştır. Bunun nedenleri arasında ilk sırayı elektrot malzemeleri ve dizaynı almıştır. Ohmik ısıtmanın geçmişteki uygulamalarının yanında günümüzde kapsadığı uygulamalar; dehidrasyon, renk açma, fermantasyon, buharlaştırma ve ekstraksiyondur. Bunun yanı sıra, ürünün pişmesi ve sterilizasyon işleminin tek bir sistem içerisinde gerçekleşmesi ohmik ısıtma sisteminin aseptik dolum ve paketleme sistemleriyle birleştirilmesi sayesinde olmuştur (Knirsch vd 2010).

Ohmik ısıtma Asya ve Avrupa kıtalarının yanı sıra ABD'de, tanecikli yapıya sahip düşük ve yüksek asitli gıdalar ile yüksek kalite ve güvenlik gerektiren gıda ürünlerinin üretiminde kullanılan teknolojidir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki altı eyalette ticari elektrikli pastörizatörler çalışmaktadır (Sastri 1992).

Son otuz yılda, ohmik ısıtma için yeni ve geliştirilmiş malzemeler ve tasarımlar kullanıma sunulmuştur. Büyük Britanya Elektrik Konseyi sürekli akışlı bir ohm ısıtıcıyı patentlemiş ve ohmik ısıtma teknolojisini APV Baker firmasına lisanslamıştır (Skudder 1988). Ohmik ısıtma APV'in geliştirmiş olduğu patentli sisteme vermiş olduğu isimdir. Ancak bu konuda yapılan birçok araştırmada, adını Ohm kanunundan alan "Ohmik ısıtma" teriminin tercih edildiği görülmektedir (Baysal vd 2011). Bu teknolojiye duyulan ilgi, devam eden gıda endüstrisinin sıvı partikül içeren gıdaların aseptik işlenmesine olan talepten kaynaklanmaktadır. Partiküller için aseptik işleme sistemlerinin temelinde ısıyı katı faza transfer eden sıvı fazın ısıtılması bulunmaktadır. Ohmik ısıtma görünüşte cazip bir alternatif sunar çünkü dahili ısı üretimi yoluyla malzemeleri ısıtır (Fadl ve Shuli 2014).

Ohmik Isıtmanın Avantajları ve Dezavantajları

Ohmik ısıtmanın avantajları; daha iyi ürün kalitesi, daha az pişirme süresi, daha düşük sermaye maliyeti, daha iyi enerji verimliliği ve aynı zamanda çevre dostu olmasıdır. Diğer elektro ısıtma yöntemlerine göre daha düşük sermaye maliyeti gerektirir. Freyer ve arkadaşları aynı zamanda, işlemin enerjinin gıda maddesine nüfuz edebileceği derinlikle sınırlanabildiği mikrodalga işlemeye göre bir avantajı olduğunu belirtir (Fryer vd 1993). Geleneksel ısı eşanjörleri kullanılarak işlenmesi zor olan büyük partiküllü gıdaları (1 inç'e kadar) işlemek mümkündür. Buna ek olarak, ohmik ısıtıcı temizleme gereksinimleri, gıda temas yüzeyindeki ürün kirliliğinin azalması nedeniyle geleneksel ısı değiştiricilerinininkinden nispeten daha azdır (Varghese vd 2014). Önceki araştırmalar, kombine ohmik ve tabak pişirmenin, hamburger köftesinin geleneksel tabak pişirme işlemine göre pişirme süresini iyileştirebileceğini göstermiştir.

Çeşitli ekonomik çalışmalar, gıda işlemedeki ohmik ısıtma teknolojisinin ticari uygulamasının genel maliyetini ve uygulanabilirliğini anlamada önemli bir rol oynayacaktır. Teknolojinin bazı aksaklıkları ve dezavantajları da doğal olarak tartışılmaktadır.

Ohmik ısıtma, özellikle yarı katı ve partikül gıdaların işlenmesinde avantajlıdır. Geleneksel termal işleme ve mikrodalga ısıtma, radyofrekans ısıtma ve indüksiyon ısıtma gibi yeni termal alternatif teknolojilere göre kanıtlanmış avantajlara sahiptir. Daha iyi ürün kalitesi, daha az pişirme süresi, daha düşük sermaye maliyeti, daha iyi enerji verimliliği ve çevre dostu bir süreç temel avantajlardır. Diğer elektro ısıtma yöntemlerine göre daha düşük sermaye maliyeti gerektirir. Ev koşullarında imbik (damıtma) torbalarıyla elde edilen gıdalar ve seri üretim gıdaları için ohmik ısıtma, gıda güvenliğini iyi bir şekilde sağlamıştır. Steril olan ve raf ömrü 3 yıl olan ohmik olarak ısıtılmış güveç tipi ürünler askeri rasyonlara dahil edilir.

Avantajları

1. Gerekli sıcaklığın çok hızlı bir şekilde elde edilmesi
2. Daha hızlı ısıtma oranları ile sıvının hızlı düzgün/eşit ısıtılması
3. Yüzey kirlenmesindeki sorunların azalması
4. Akım kapatıldıktan sonra hiçbir şekilde artık ısı transferi olmaması
5. Düşük bakım maliyetleri ve yüksek enerji dönüşüm verimliliği
6. Sistemin anında kapatılması
7. Hareketli parçaların olmaması nedeniyle bakım maliyetlerinde azalma
8. Sessiz bir çevre dostu sisteme sahip olması
9. Isı transfer yüzeyindeki kirlenme riskinin azalması
10. Ekipmanların kullanımı pratiktir.

11. Sistem diğer ekipmanlara göre daha az yer kaplar.
12. Karıştırma işlemine gerek kalmadan ısıtma işlemi gerçekleştirilebilmektedir.
13. Ohmik ısıtmanın en bilinen avantajı, partikül içeren gıdalar dahil olmak üzere gıda maddelerini hızlı ve homojen şekilde ısıtması ve geleneksel yöntemlere göre gıdanın besin değerini ve rengini koruyabilmesidir (Sastry ve Barach 2000).
14. Partiküllü gıdaları ve sıvı-partikül karışımları ısıtılabilir.
15. Ürünün hasar görme riski düşüktür.
16. Yanık, birikim ve üründe katılaşma oluşmadığı için temizlik ve bakım maliyetinde azalma görülür.

Dezavantajları

1. Genel bilgilerdeki eksiklik
2. Sütün iletkenliğine göre istenen uyum eksikliği
3. İzlemesi ve kontrol etmesi zor
4. Sıcaklık dağılım kontrolü
5. Sıcaklık ve elektrik alanı dağılımı arasında karmaşık bağlantı
6. Sistemin iyi bir elektriksel izolasyon ve kontrol sistemi tasarımı konusunda eksiklikleri vardır.
7. Gıda oluşumunu sağlayan maddelerin bazılarının düşük ısı iletkenliğine sahip olması ve gıdanın şekil açısından düzensiz oluşu, gıdaların ısı işlenmesinde ve elektriksel işlem uygulamalarında olumsuz sonuçlara sebebiyet vermektedir.
8. Gıda işleme süresinde gıdanın sıcaklık dağılımında kontrolün sağlanması gereklidir. Özellikle et ürünlerinde yağ bileşenin ve kas yapısının elektriksel iletkenlikleri farklılık gösterir. Bu sebeple pişmiş üründe soğuk bölgeler oluşur, bu da istenmeyen bir durumdur.

Yukarıda değinilen dezavantajların giderilmesi veya avantaja dönüştürülmesi için aşağıda sıralanan bazı önerilerde bulunulmuştur;

1. Ohmik ısıtma modellerinin öngörücü, belirlenebilir ve güvenilir modellerini geliştirmek
2. Sütün iletkenliğinin değişikliğine göre istenilen iletkenliğin teminini sağlamak için sağlam bir geri besleme kontrolü geliştirmek gereklidir ve bunun için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.
3. Ohmik ısıtma sırasında soğuk noktaları ve aşırı ısınmış bölgeleri bulmak için gerçek zamanlı sıcaklık izleme tekniklerinin geliştirilmesi

4. Ohmik ısıtma teknolojisinin ticarileştirilmesi için yeterli güvenlik ve kalite güvence protokollerinin geliştirilmesi

Tablo 1. Ohmik Isıtma ile Diğer Isıtma Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Fadl ve Shuli 2014).

	Prensip	Verim	Isıtma Malzemesi	Operasyon parametreleri malzemesi
Ohmik ısıtma	Isıtma numunesinden bir elektrik akımı geçirilir, bu da elektrik enerjisinin ısıya dönüştürülmesinden dolayı bir sıcaklık artışına neden olur.	Konvansiyonel ısıtmaya kıyasla ısıtma sürelerini %90-95 azaltırken %100'e yakın enerji verimliliği ve eşit sıcaklık dağılımı ile %82-97 enerji tasarrufu sağladı.	Sıvı Katı Sıvı Katı	Isıtma örneğinin elektriksel iletkenlik pH'ı Gerilim gradyanı
Isı direnci ısıtma	Bir dirençten geçen elektrik akımı, elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürür.	Elektrik enerjisinin yaklaşık %100'ünü ısıya dönüştürür.	Sıvı Katı Sıvı Katı Gaz	İletken, taşınım ve ışınımsal ısı aktarım katsayılarına bağlıdır.
Mikro dalga ısıtma	Enerji, elektromanyetik alanla moleküler etkileşim yoluyla doğrudan malzemelere iletilir.	2,45 GHz'de %65'e kadar.	Sıvı Katı Sıvı Katı	Dahili dielektrik özelliklere, elektromanyetik alan dağılımına ve ısıtma parçasının şekline bağlıdır.
Isı pompası ısıtma	Elektrikle çalışan bir buhar sıkıştırma çevrimi ve çevresindeki havadan enerjiyi bir depolama tankındaki suya pompalar.	Çalışma koşullarına bağlı olarak COP yaklaşık 2,1	Sıvı Gaz	Kondenser giriş sıcaklığı Kondenser çıkış sıcaklığı Evaporatör girişinde kuruluk oranı Evaporatör çıkış sıcaklığı

KURAMSAL TEMELLER

Ohmik ısıtma konsepti yeni değildir; 20. yüzyılın başlarında süt ve diğer gıda maddelerinin elektriksel pastörizasyonunun, aralarında voltaj farkı olan plakalar arasına sıvı pompalanarak sağlanması şeklinde kullanılmıştır (De Alwis ve Fryer 1990). Amerika Birleşik Devletleri'ndeki altı eyalette ticari elektrikli pastörizatörler çalışmaktadır (Sastry 1992).

Ohmik ısıtma konusunda yapılan ilk çalışmalar 1897 yılında F. Jones'in kurduğu bir sistemle başlamıştır (Baysal vd 2011). Fakat çok öncelerde "Electro-pure" şeklinde adlandırılan pastörizasyon sistemi 1928 yılında Fetterman'ın geliştirdiği bir sistemdir ve o devirde henüz gelişmekte olan süt endüstrisi için çok önemli bir aşama olarak nitelendirilmiştir. Fakat bundan başka aynı çalışmada bazı sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunlar; gıda ile elektrot arasındaki temasın istenilen düzeyde elde edilememesi, elektrotların kenar kısımlarında olukların meydana gelmesi, gıda ürününe metallerin geçişiyle karşılaşılması ve proses kontrolünün yapılmasının zor olmasıdır (İcier 2005). Hızla gelişen teknoloji sayesinde 1990'lı yılların başından itibaren adı geçen sorunları çözüme konusunda bir hayli ilerleme kaydedilmiştir. Sistemin karakterize edilmesi ve modellenmesi, ısıtma işlemine etki eden faktörlerin tespit edilmesi ve ohmik ısıtma sisteminin değişik gıda ürünlerinde uygulanması gibi konulara ağırlık verildiğini son yıllarda yapılan çalışmalarda rastlamak mümkündür.

McConnel ve Olsson'un tasarımında (Mcconnel ve Olsson 1938) Frankfurt sandviçleri, önceden belirlenmiş bir süre boyunca elektrik akımından geçirilerek pişirildi. Diğer taraftan Schade (Schade 1951) ohmik ısıtma kullanarak patatesin enzimatik renklenmesini önlemek için bir ağartma yöntemini ortaya koymuştur. O zaman ölümcül etkilerin elektriğe atfedilebileceği düşünülüyordu. Teknoloji, uygun inert elektrot malzemeleri ve kontrollerinin olmaması nedeniyle, ilerleyen yıllarda neredeyse ortadan kayboldu. O zamandan beri, teknoloji elektro iletken çözümler dışında sınırlı ilgi görmüştür (De Alwis ve Fryer 1990).

Brunton ve arkadaşları, emülsiyon hamurlarının ohmik ısıtma kullanarak çok hızlı piştiklerini bildirmişlerdir. (Brunton vd 2005). Bir prototip ohmik ısıtma hücresinin geliştirilmesi, geleneksel jambonlu pişirme yöntemine kıyasla Bologna jambonlarının laboratuvar ölçeğinde hızlı pişirilmesini mümkün kılmış, pişirme süresi %90 ila 95 oranında azaltılmıştır (De Halleux vd 2005). Minimum pastörizasyon kriterlerini karşılayan hızlı pişirme elde etmek için 75 ° C'den yüksek bir pişirme sıcaklığı gereklidir. Ohmik ısıtma teknolojisinin en önemli faydaları ısı transfer yüzeyleri olmadan sürekli işleme, sıvıların ve taşıyıcı sıvıların

karşılaştırılabilir oranlarda eşit ısıtılmasıdır, böylece Yüksek Sıcaklık Kısa Zaman (HTST) tekniğinin kullanılması mümkün hale gelir (Parrott 1992).

Palaniappan ve Sastry (1991a) portakal suyu ve domatesin ohmik ısıtılması esnasında elektriksel iletkenlik değerlerinin birbirinden farklı voltaj gradyanları (30-60 V/cm), partikül boyutu ve çözünmeyen katı içeriklerine bağlı olarak görülen değişiklikler üzerinde çalışmıştır. Elektriksel iletkenliğin katı içeriğine ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir (İçier 2005).

Qihua ve arkadaşları (1993) ohmik ısıtma ünitesi tasarımını sıvı gıdalar için gerçekleştirmiştir. Sistemin optimizasyonu göz önüne alındığında kesikli ısıtma testlerinde portakal suyu örneklerini 3,3-40 V/cm voltaj gradyanı aralığında 80°C'ye kadar ısıtma sağlamışlardır. Voltaj arttıkça ihtiyaç duyulan ısıtma süresinin üssel olarak değiştiğini dile getirmişlerdir. Ancak portakal suyunun konsantrasyonu ile ilgili herhangi bir açıklama yapılmamış ve elektriksel iletkenlik-sıcaklık değişim bağlantısı yalnız 10 V/cm için bilgi verilmiştir (İçier 2005).

Schreier ve arkadaşları (1993) ohmik ısıtma kullanılarak çözünür madde difüzyonunun arttığını gözlemlemişlerdir. Uygulanan voltaj ve partiküllerin yüzey alanı ile difüzyonun, doğrusal olarak değişikliğe uğradığını ifade etmişlerdir (İçier 2005).

Wang (1995) çalışmasında, havuç, tatlı patates ve patates gibi ürünlere uygulanan sıcak hava ile ısıtma, mikrodalga ısıtma ve ohmik ısıtma önışlemlerinin kurutma hızı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu araştırmanın sonucunda ohmik ısıtmanın kurutma hızını en çok artırıcı ön ısıtma işlemi olduğunun altını çizmiştir (İçier 2005).

Lima ve arkadaşları (1999) çapı 2,35 cm olan silindir turp örneklerini 4-60 Hz frekans aralığında farklı dalga şekilleri ile 15,4 V/cm ve 30,8 V/cm voltaj gradyanında 25°C'den 100°C'e çıkarmıştır. Bu üç dalga formunda da elektriksel iletkenliğin artması sıcaklığın artmasıyla doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Tüm frekanslarda karesel dalga formundaki elektriksel iletkenliğin testere dişi dalga formunun sinuzoidal formdan daha yüksek olduğu ve frekans arttıkça ısıtma hızının azaldığı dile getirilmiştir (İçier 2005).

Sung ve arkadaşları (1995) balık proteini jelinin ohmik ısıtılmasında frekansın etkisi üzerine çalışma yapmıştır. Jel örnekleri, 50 Hz-10 kHz arasındaki frekanslarda ve 0-20 V alternatif akım aralığında 90°C'ye kadar ısıtılmıştır. Frekans arttıkça ısıtma hızının da doğru orantılı olarak arttığı ifade edilmiştir (İçier 2005).

Li ve Sun (2002), Ohtsuki (1993)'ün donmuş gıdaların çözündürülmesinde ohmik ısıtmayı kullandığı bir sistemin patentini aldığını belirtmiştir. Ohmik ısıtma sisteminde donmuş

ton balığı, et ve yumurtanın -3°C 'den $+3^{\circ}\text{C}$ 'ye oldukça kısa sürede çözündürülmesinin olanaklı hale geldiğini bildirmiştir (İçier 2005).

Roberts ve arkadaşları (1998) donmuş deniz ürünlerinin çözündürülmesi için otomatik kontrollü ohmik sistem tasarımını ortaya koymuşlardır (İçier 2005).

Castro ve arkadaşları (2003) çilek tabanlı ürünlerin elektriksel iletkenliğinin sıcaklık arttıkça arttığını, fakat şeker içeriği ve katı madde içeriği arttıkça azaldığını tespit etmişlerdir (İçier 2005).

De Alwis ve Fryer (1990b; 1992a) gıdaların ohmik ısıtılması sırasında ısı jenerasyonu ve transferini tahlil etmiştir. Sonlu element yöntemiyle çözüm yaparak ortaya koydukları modeli sunmuşlar ve statik ohmik ısıtma sisteminde, partikül şekli ve yerleşiminin önemli olduğuna değinmişlerdir. Bunun yanı sıra partikül ve sıvıların elektriksel iletkenliklerin farklı olduğu zamanlarda sıcaklık dağılımlarını gözlemlemişlerdir. De Alwis ve Fryer (1992b) daha önceki çalışmalarında geliştirmiş oldukları model sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar, elektriksel iletkenliği homojen olmayan gıdalara model olması açısından kompozit partiküllerin sıvı içindeki ohmik ısıtılması konusunda kapsamlı çalışmalar yapmışlardır. Oldukça yüksek veya düşük elektriksel iletkenliğe sahip katılarda katı-sıvı arasında sıcaklık farkının meydana gelebileceğini ifade etmişlerdir (İçier 2005).

Sastry (1992) devamlı akışa sahip ohmik ısıtıcılarda sıvı-partikül karışımlarının ısıtılması üzerine modelleme çalışması uygulamıştır. Katı partiküller sıvılardan daha hızlı ısınmıştır ve bu durumu raporlamıştır. Ancak sisteme yalıtkan partiküller dahil olursa, bu partiküllerin yerleşimine bağlı olarak sıvının çok daha geç ısınmasına sebebiyet verecekleri kanaatine varılmıştır (İçier 2005).

Zaror ve arkadaşları (1993) çalışmalarında ohmik ısıtma sisteminin sterilizasyon amacıyla kullanımı için matematiksel model çalışmaları yürütmüşlerdir. Sürekli akışa sahip ohmik ısıtma ünitesinde katı ve sıvı fazlar için enerji denklemleri çözümlenmiştir. Sterilizasyon bekletme bölümü için ise enerji denklemleri boyutsuz form haline getirilerek irdelenmiştir. Mikrobiyolojik ölüm oranı, 1. dereceden kinetik denklemlerle dile getirilmiştir. Sıvı fazın 135°C 'ye erişmesi için ohmik ısıtıcıda kalma süresi ve tespit edilmiş mikrobiyolojik ölüm oranına varabilmek için bekletme kısmındaki bekleme süreleri model ile hesaplatılmıştır (İçier 2005).

Fryer ve arkadaşları (1993) bu çalışmalarında katı-sıvı karışımları üzerine yaptıkları kuramsal çalışmanın sonuçlarını mukayese etmek için deneysel verilere ulaşmışlardır. Sıvı olarak tuz eklenmiş CMC çözeltileri, yalıtkan katı olarak ahşap parçacıklar dahil edilmiştir.

Statik test hücrelerinde sıvı içinde yalıtkan madde olması durumunu, düşük elektriksel iletkenliğe ait katı maddelerin ohmik ısıtılmasına ait model sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Modelde katı içinde ısı iletiminin olmadığı ve sıvı içinde bir hayli hızlı ısı iletimi ve konveksiyonunun olduğu durumlar için sıcaklık profilleri incelemiştirlerdir (İçier 2005).

Quarini (1995), ohmik ısıtma kolonunun termo-hidrolik özelliklerini incelemiş ve matematiksel model ortaya koymuştur. Bununla birlikte momentum ve ısı denklemlerini aynı anda çözmüştür. Sıvıların ohmik ısıtılması esnasında, kolon içi hız dağılımının sıcaklık profili üzerinde etkili olduğu ve kolon duvarlarının soğutulmasının homojen sıcaklık profili elde etmeye faydası olduğu bildirilmiştir. Hacimsel ısı jenerasyon hızı sıcaklığın doğrusal fonksiyonu olarak yazılmış ve yüksek sıcaklık bölgelerinde düşük sıcaklık bölgelerinden daha fazla ısı jenerasyonu olduğu vurgulanmıştır (İçier 2005).

Fryer (1995) katı-sıvı karışımlarının ohmik ısıtma ile ısıtılması konusunda yaptıkları tüm kuramsal çalışmalarını derlemiş ve karşılaştırmalı olarak vermiştir (İçier 2005).

Lacey ve arkadaşları (1999) gıdaların ohmik ısıtılmasının modellenmesinde değişkenlerin ısıtma sırasındaki değişimlerini ve homojen olmayan dağılımlarını dikkate almıştır. Gıda içinde homojen yapının olmaması durumunda, bölgesel aşırı ısınan ve yanan kısımların oluşabileceğini vurgulamıştır (İçier 2005).

Benabderrahmane ve Pain (2000), katı-sıvı karışımlarının sterilizasyonunda kullanılan sürekli akışa sahip bir ohmik ısıtıcının termal durumunu inceleyen modelleme çalışmasında bulunmuştur. Kayan faz modelinin kullanıldığı nümerik çalışmada kolon içi hız dağılımı ve enerji denklemleri birlikte çözülmüştür. Karışımın elektriksel iletkenliğinin homojen olduğu durumda, katı-sıvı hacimsel oranı azaldıkça ve katı-sıvı arasındaki hız farkı arttıkça, partiküllerin merkezinde daha yüksek sterilizasyon sağlandığı belirlenmiştir. Homojen olmayan elektriksel iletkenlik durumunda ise yeterli sterilizasyon etkisinin sağlanmasının zor olduğu öngörülmüştür (İçier 2005).

Gıda ürünlerinde mikrobiyal ölümcüllük ile ilgili hükümetlerin resmi ve yasal düzenlemelerine uymak için, genellikle en büyük parçacığın merkezi olan bir sistemin en soğuk noktasında ısıtma yöntemleri uygulanır. Geleneksel ısıtmada, bu soğuk noktadaki sıcaklığı arttırmak için ihtiyaç duyulan süre zarfında geri kalan partiküller ve çevresindeki sıvı aşırı işleme maruz kalabilir. Bu aşırı işleme, besinlerin tahrip olmasına ve lezzetin azalmasına yol açar. Gıdaların muhafazası için fiziksel tekniklere dayanan termal ve termal olmayan işleme teknolojileri, tüketicinin taleplerini karşılamının yanı sıra katkısız ve uzun süreli ısıl işleme tabi tutulmamış uzun raf ömrüne sahip yüksek kaliteli işlenmiş gıdalar sunma potansiyeline sahiptir. Termal olmayan veya "cold" (soğuk) işleme tekniklerindeki araştırmalar ve gelişmelerin amacı;

istenmeyen mikroorganizmaları, alerjenleri ve enzimleri normalde termal işlemeden kaynaklanan besinsel ve duyuşsal özelliklere zarar vermeden etkisiz hale getirmektir (Varghese vd 2014).

Elektrolitik korozyon ile frekans arasındaki ilişki üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Elektro-kimyasal reaksiyon olasılığını ortadan kaldırmak ve maliyeti en aza indirmek için, şebeke elektriğinden gelen düşük frekanslı alternatif akım (50 veya 60 Hz) kullanılır (Skudder ve Stirling 1992). Elektriksel iletkenliği ve gıda ürünlerinin mutlak dielektrik kaybını ölçmek için 250 watt sağlayabilen 30 Hz ~ 1 MHz aralığına sahip çok frekanslı bir ohmik ısıtma sistemi geliştirilmiştir. Sonuç olarak elektrolitik korozyon frekansla azalır (Wu vd 1998). Makul ölçüde elektrik alan işlemleri sırasında frekans ve voltajın gelişmiş difüzyon üzerindeki etkisi, frekans aralığı 0 ile 5000 Hz arasında olduğunda araştırılmıştır (Kulshrestha ve Sastry 2003). Son zamanlarda, 100 Hz'den 20 kHz'e kadar dielektrik spektrumların ölçülmesiyle ohmik ısıtmanın hücreşel gıda malzemesinin hücre zarları üzerindeki etkisi üzerine araştırma yapılmıştır, bu da frekans ile elektriksel iletkenlik değeriğinin değerişikliğı arasında bir ilişki olmadığını göstermiştir (Kulshrestha ve Sastry 2006). Ohmik ısıtma işlemleri için doğru akımın kullanılması sıvı içeceklerde elektrolize neden olabilir. Ayrıca, alternatif akım kullanımı, elektrokimyasal reaksiyon olasılığını ortadan kaldırır. Ek olarak, frekans arttığında elektrotlarda oksidasyon riski azalacaktır (Skudder ve Stirling 1992).

Ohmik ısıtma işlemlerinde yüksek frekans kullanmanın avantajı da yer alır (Mohamed Ali 2001). 10 kHz güç kaynağının özellikle 10 kW ohmik ısıtma işlemleri için tasarlandığı görülür. Etkili ohmik ısıtma işlemlerinin kontrolünde en önemli şeylerden biri, elektrik kaynağının işlemleri sırasında sürekli akım sağlamasının yanı sıra elektroliz etkisini azaltmak için elektrotlarda hızlı ve alternatif olarak elektrik polaritesinin değerişmesine neden olmasıdır. Bu da aslında dikkate değerdir (Toudeshki 2008). Çıkışta harmoniyi azaltmak için PWM yöntemi (Mohamed Ali 2001) kullanılır, bu yöntem elektrotlardaki elektrik polaritesinin değeriştirme hızını azaltabilir. Dolayısıyla, işlemlerde olan gıdadaki elektroliz olgusu ve elektrokimyasal etkiler tamamen ortadan kaldırılmamıştır (Toudeshki 2008).

Isıl işlemlerde gıda maddelerinin elektrik iletkenliği ve frekansın etkisini, elektrotlardaki elektrolizi ve oksidasyonu araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Ancak hiçbirisi, bir elektrik yükü olarak ohmik ısıtma işlemleri için tasarlanmış güç kaynağını kullanmamıştır (A. Toudeshki 2008).

Ohmik ısıtmanın özel avantajı; gıda kalitesini artırması, maliyeti azaltması ve enerji tasarrufu sağlamasıdır. Ohmik ısıtma, güvenli, yüksek kaliteli gıda üretebilir. Ohmik olarak işlemlenmiş gıdaların raf ömrü, konserve ve steril, aseptik (bakteriler, virüsler, mantarlar ve

parazitler veya zararlı sporlardan arınmış olma durumu) olarak işlenmiş ürünlerle karşılaştırılabilir. Gıda bir elektrik direnci görevi görür. Bu madde elektrik enerjisinin yayılmasıyla ısıtılır. Elektrik dirençli ısıtma, partiküllerin ve sıvıların aynı oranda, eşit hızla ısınmasına izin verir ve yüksek katı fraksiyonlarına sahip karışımların hızlı bir şekilde ısıtılmasına izin verir. Süreci anlamak için, gıda elektrik iletkenliğini incelemek ve ortaya çıkan ısıtma modellerini tahmin etmek gerekir. Elektrik akımı kullanılarak gıdalar, mevcut işleme yöntemlerine (USFDA-Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi 2000) eşit bir şekilde pastörize edilebilir, fermente edilebilir veya sterilize edilebilir (Varghese 2014).

Ohmik ısıtmanın gıdaların mikrobiyolojik kalitesi üzerindeki etkisi önemli bir konudur. Deneysel tasarım genellikle yiyeceğe temas eden elektrotlardan oluşur; böylece elektrik, çeşitli voltaj ve akım kombinasyonları kullanılarak maddeden geçirilir. Gıda endüstrisi son yıllarda ohm teknolojisine yeniden ilgi göstermiş ve 90'lı yılların başından bu yana yeni sistemler geliştirilmiştir. Knirsch ve arkadaşları tarafından 2010 yılında ohmik ısıtma işlemi üzerine bir inceleme yapılmıştır. Konuyu mikrobiyal inaktivasyon, elektroporasyon etkileri ve kritik proses parametreleri ile ilgili olarak gözden geçirmişlerdir. Sürekli bir sterilizasyon işleminde tam olarak ölçülecek ve belirlenecek en kritik faktörler, en soğuk noktanın sıcaklığına ve ısıtma ve tutma sisteminde harcanan en kısa kalma sürelerine sınıflandırılabilir (Knirsch vd 2010). Sastry, düşük iletkenliği olan bir parçacığın yüksek iletkenliğe sahip bir ortamla çevrelenmesi durumunda, bu partikülün termal olarak akışkanın gerisinde kalacağını gözlemlemiştir. Düşük iletkenlikli izole parçacıklar sisteme girerse, yetersiz işleme tehlikesi oluşur (Sastry 1992).

Ohmik ısıtma sırasında elektrot çözeltisi ara yüzlerinde istenmeyen elektrokimyasal olaylar, uygun bir elektrot malzemesi seçilerek etkili bir şekilde önlenabilir. Samaranayake ve Sastry, pH 3.5, 5.0 ve 6.5'te titanyum, paslanmaz çelik, platinize titanyum ve grafit gibi dört tip elektrot malzemesinin elektrokimyasal tepkilerini öğrenmeye çalışmıştır: Elektrotlar 60 Hz sinüzoidal alternatif akım kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, tüm pH değerlerinde platinize titanyum elektrotların nispeten eylemsiz elektrokimyasal davranışını vurgulamaktadır. 39.8 kW'lık bir pilot ölçekli çalışma ayrıca yaygın olarak mevcut düşük frekanslı alternatif akımlara sahip gıdaların ohmik ısınması için platinize titanyum elektrotların potansiyel kullanımını göstermektedir (Samaranayake ve Sastry 2005).

Güvenlik açısından, en kötü senaryoyu belirlemek önemlidir ve bu büyük olasılıkla sistemdeki tespit edilmemiş düşük iletkenlik parçacıkları ile ilişkilidir. Di Geronimo ve Garthright, sistemin karakteristik en hızlı parçacığını güvenilir bir şekilde belirlemek için dağılımsız bir yöntemin en uygun yöntem olduğunu belirtmiştir (Di Geronimo ve Garthright 1997). Ramaswamy, Sastry ve Cornelius katı-sıvı akışının kalma süresi dağılımını (RTD-

Residence time distribution) incelemek ve araştırmak için geliştirilen manyetik yöntemler ve radyo frekansı tanımlama yöntemleri gibi çeşitli teknikleri gözden geçirdi (Ramaswamy vd 1995; Sastry 1997; Sastry ve Cornelius 2002). Manyetik yöntemlerin kullanımı, küçük mıknatıslar içeren etiketli parçacıkların eklenmesiyle uygulanır (Segner vd 1989; Chandarana ve Unverferth 1996). Bununla birlikte, aynı anda dedektörden geçen çoklu parçacıkları ayırt edememesi bunun temel eksikliklerinden biridir denilebilir. Bu, bir sonraki izleyiciyi yerleştirmeden önce her manyetik izleyici sisteme girip çıkana kadar operatörün beklemesini gerektirir (Sastry ve Cornelius 2002).

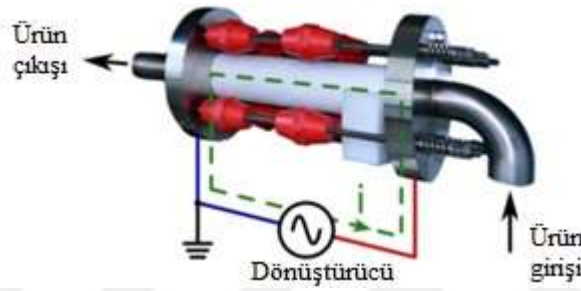
Bu çalışmada öncelikle ohmik ısıtma ile ilgili bir devre sistemi tasarlayıp, bu sisteme bir kontrol yöntemi uygulayarak ohmik ısıtma tasarımını gerçekleştirdikten sonra MATLAB SİMULİNK ile bu tasarımın simülasyon çalışmasını amaçladık.



MATERYAL METOD

Ohmik Isıtma

Ohmik ısıtma (OH); maddenin ısıtıldığı, içinden doğrudan akımın geçtiği bir tekniktir. Bu tekniği kullanan bir deney düzeneği Şekil 1’de verilmiştir ve bu teknik yaklaşık yüzyıllık bir geçmişe sahiptir (Bansal ve Chen 2006) ve (Jones 1897.). Şu anda da yüksek seviyede kullanılabilirliğini sürdürmektedir, potansiyeli nedeniyle gelecekte de bu sistemin uzun süre etkili olması beklenmektedir.



Şekil 1. Ohmik ısıtma deney düzeneği (Soldati vd 2019)

Ohmik ısıtma avantajları; kesitsel sıcaklık homojenliği, yüksek hız, kontrolündeki kolaylık, yüksek verimlilik ve ürün bütünlüğüdür (Bengtson vd 2006; İçier 2012). Ayrıca bunu, ekonomik açıdan hem olumlu hem olumsuz olarak nitelendiren çalışmalar vardır. Bu çalışmalar, üretim maliyetlerinde olası artış olsa dahi dondurulmuş ürünlerin üretim sonrası lojistiğinde hedefe ulaşabilir (Bertolini ve Romagnoli 2012). Ayrıca, modern yalıtımlı kapı bipolar transistör (IGBT) teknolojisi, ana şebekeden (sinüzoidal) darbeli ohmik ısıtmaya (POH) geçişe izin verir, böylece üretim makineleri için düşük amortisman maliyetlerine imkan vermiş olur (Samaranayake vd 2006).

Literatürde çeşitli ohmik ısıtma tasarımları ortaya konmuştur. Birçok ohmik ısıtma uygulaması bir çeşit alternatif dalga formlarına dayandığı için iyonik çözeltilerdeki iletkenliğin frekans hareketi hakkında çeşitli çalışmalar mevcuttur. Literatürde hem ilk prensip modelleri (Chandra ve Bagchi 2000) hem de ampirik çalışmalar bulunmaktadır (Lima vd 1999). Sonuçlar, analiz edilen her farklı maddeye özgü olmasına rağmen büyük dalgalanmaların düz bir davranışla bu eşğin üzerinde çok düşük frekanslarda (genellikle 10 Hz'nin altında) olduğunu göstermektedir. Bu, ohmik ısıtma ile gıdaların işlenmesinde ac tekniklerinin etkili ve faydalı bir şekilde çalışmasını sağlar.

Daha önceki tasarımlar şebekenin kullanımına yönelikti (Samaranayake vd 2006) ancak bazı çalışmalarda 50-60 Hz'nin elektrot korozyonuna yol açabileceği belirtilmiştir (J. Morren vd. 2003; (Bansal ve Chen 2006; Samaranayake vd 2006) Bu nedenle POH aparatları geliştirilmiştir. En yaygın çıkış aşaması POH isteniyorsa daha avantajlı olan IGBT tam köprüler (Ramos ve Tacca 2013) veya üç fazlı köprüler oluşturulur (Toudeshki vd 2008). Daha önce, şebeke frekans tabanlı tasarımlar tristörlerin ve hatta varyakların faz açısı kontrolüne dayanıyordu (Ghnimi vd 2008). İstenen sıcaklık değişimini elde etmek ve değişen güç talebini karşılamak için kontrol gereklidir. Sistemde gerilim kontrolü H köprülerle veya invertörlerle gerçekleştirilir.

Bazı tasarımlarda çıkış aşaması çıkış voltaj seviyesini, dolayısıyla elektrik alanını kontrol etmez, bu nedenle köprüye bir giriş aşaması eklenir (Toudeshki vd 2008). Güvenlik amacıyla bir çıkış transformatörü zorunludur fakat daha önceki literatürde bu zorunluluk teknik bağlamda her zaman uygulanmamıştır (Wenyan ve Lu 2011).

Önerilen dönüştürücü; bir diyot köprü doğrultucu, faz kaydırma kontrollü tam köprü dönüştürücü, çok kademeli çıkış transformatörü ve kontrol algoritmalarının üçlüsünden oluşur. Tam köprü (H-köprü) dönüştürücü, güç elektroniğinde en çok kullanılan uygulamalardan biridir, gerilim veya akım girişi olan hem doğrultucu hem de invertör olarak çalışabilir.

Aktif bir güç filtresinin dc-yan kapasitörü üzerindeki voltaj dalgalanmasını kontrol etmek için bir algoritma önerilirken diğer kontrol teknikleri dinamik voltaj düzelticisinin transformatoründeki dc-akı sapsmasını kontrol etmek için kullanılmıştır (Mannen ve Fujita 2016).

Bu çalışmada doğru seçim ve uygun tekniklerin bir arada kullanılmasıyla gerçekleştirilecek bir uygulama amaçlanmıştır. Bu uygulamada yüksek güçlü dönüştürücüler (10 kW'dan fazla) nadiren kullanılmaktadır. Ön hazırlık aşamasında elde bulunan literatür, nadiren yüksek güçlü dönüştürücülerle (10 kW'dan fazla) ilgilenir ve ön çalışma sırasında uygulanan alternatif çözümlerin hiçbiri sunulan dönüştürücünün neden olduğu sorunları çözmez. Ayrıca, multitap çıkış transformatörü ve ilgili otomatik kademe için gerekli olan donanım ve prosedür bu alanda önemli bir yenilik olarak düşünülebilir.

Ohmik Isıtma Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Faktörler

Endüstriyel çaptaki ohmik ısıtma sistemleri konusunda deneyimlerin kısıtlı olması sebebiyle, proses tasarımında tüm parametrelerin etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gereklidir (İçier 2003,2005). Ohmik ısıtma tasarımında etkili olan faktörlerin bazıları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- Elektriksel direnç
- 2- Voltaj
- 3- Akım Yoğunluğu
- 4- Uygulanacak Güç
- 5- Elektroliz
- 6- Gıda Maddesinin Özellikleri
- 7- Isıtma Hızı
- 8- Sıcaklık Kontrolü
- 9- Elektriksel Özellikler
- 10- Mekaniksel Özellikler
- 11- Bekletme Süresi
- 12- Frekans ve Dalga Boyu

Elektriksel direnç; bir ürünün elektriksel direnci ve bu direncin sıcaklık ile değişmesi ohmik ısıtma işleminin en önemli faktörleridir (Kaur ve Singh 2016). Elektriksel direncin azalması ürün sıcaklığının yükselmesine bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda yapılan işlemler sürenin uzamasına sebep olur (Fadl ve Shuli 2014). Bir ohmik ısıtma ünitesinin gerçek direnci, ürünün spesifik elektriksel direncine ve ısıtıcı ünitesinin boyutlarına bağlıdır (İçier 2003).

Gıda ürünün elektriksel direnci 1 cm^2 alanda 1 cm aralıklarla yerleştirilmiş elektrotların arasına sıkıştırılan elektrik akımına karşı göstermiş olduğu direnç olarak belirtilmektedir. Ohmik ısıtma ünitesinin gerçek direncini ohmik ısıtma ünitesinin boyutları ve elektriksel direnci belirler. Aynı zamanda uygulanacak güç ohmik ısıtma ünitesinin boyutlarına bağlı olarak değişir. Uygulanacak güç belli ise, kullanılacak ürüne göre ısıtıcı boyutlarının tasarımı gerekir (Reznick 1996).

Voltaj; düşük voltajlı çalışmalarda ihtiyaç duyulan gücün elde edilebilmesi için çok yüksek akım değerlerine ulaşmak gerekecektir. Yüksek akım değerlerine ulaşmak güç olacağından düşük akım değerlerinde çalışmayı uygun hale getiren transformatörler kullanılır. Transformatörün güç spesifikasyonu, gerekli olan güçten %30 daha fazla olacak şekilde tasarlanmalıdır (Roberts vd 1998; Reznick 2000).

Akım yoğunluğu; akım yoğunluğu en önemli parametrelerden biridir. Akım yoğunluğu aynı zamanda akımın elektrot alanına bölünmesidir (Reznick 1996). Kritik akım yoğunluğu değeri aşıldığında sistemde ark meydana gelir. Elektrotların minimum alanının tespit edilebilmesi için kritik akım yoğunluğu ve sistemin toplam akım değerinin belirlenmiş olması gerekir. Ürünün direnci de alanın fonksiyonudur ve bundan ötürü elektrotlar arasındaki gerekli mesafe de tespit edilebilir (Roberts vd 1998).

Uygulanacak güç; gıdanın elektriksel direnci göz önüne alınarak uygulanacak güç belirlenebilir. Uygulanacak güç ve voltajın yanı sıra önemli olan diğer bir nokta da bunlara bağlı olarak sistemden geçen akımın maksimum değeridir. Sisteme bağlı olan kritik akım değeri tespit edilmesi ile birlikte elektrotların yerleştirilmesindeki gerekli ayarlama da oldukça öneme sahiptir (Tempest 1996; Roberts vd 1998).

Elektroliz; doğru akım az şiddette elektrolitik etkiye sahiptir ancak düşük frekanslı alternatif akım daha az şiddette elektrolit etkiye sahiptir. Bu elektrolitik etkiler arasında en önemli olanı metal elektrotların ürünü kirletmesi ve saflığını kaybetmesidir. Bu sorunu yok edebilmek için izlenmesi gereken en önemli yol, 100 kHz'in altında alternatif akım uygulamaktır. Bunların dışında bu sorunu yok etmek için başvurulan yöntem; saf karbon, paslanmaz çelik ve platin kaplı elektrotların kullanılmasıdır (Sastry ve Salengke 1998; Zhao vd 1999).

Gıda maddesinin özellikleri; gıda karışımı içerisindeki farklı ısıtma hızlarının ortaya çıkmasına sebebiyet verebilen faktörler partikülün şekli, boyutu, partikül ve taşıyıcı sıvının ortalama yoğunluğudur. Viskozitenin sıvılarda etkisinin bir hayli az olduğu bilinmektedir. Sıcaklık gradyanlarının ortaya çıkmasına neden olan şey ise partikül ile sıvı iletkenlikleri ve özgül ısılar arasındaki farktır (Zoltai ve Swearingen 1996; Sastry ve Li 1996; Larkin ve Spinak 1996).

Isıtma hızı; ohmik ısıtıcılarda ısıtma hızına paralel olarak gıdanın akış hızının da sürekli olarak ayarlanması gereklidir. Protein içeriği fazla olan gıdaların akıcı niteliğini kaybederek pelte kıvamında kitle durumuna dönüşmesi istenmiyorsa sözü edilen ayarlama çok önemli bir faktördür. Gıda maddesinin bir bölümünün ya da tamamının faz değişimine uğraması sonucu sistemde ark meydana gelir. Akış hızındaki ufak bir değişim 50°C/s gibi yüksek ısıtma hızlarında kayda değer bir sıcaklık farkına neden olacaktır. Böylesi bir durumda ısıtıcı içerisinde bulunma zamanı ve buna bağlı olarak da kullanılacak pompa iyi ayarlanmalıdır (Biss vd 1989; Kim vd 1996a). Marcotte ve arkadaşları bu konuda yaptıkları çalışmada, partikül ihtiva eden karışımların ohmik ısıtma bölgelerinde kalma zamanlarını araştırmak amacıyla ultrasonik metotlardan faydalanmanın yerinde olacağını dile getirmektedirler (Marcotte vd 2000a).

Sıcaklık kontrolü; sıcaklık kontrolü için en önemli faktörler gıda ürününün akış sıcaklığı veya son sıcaklığının kontrolüdür. Bu noktada güç ayarlaması yapılabilir. Bu ayarlama; sistemlerdeki giriş sıcaklığındaki, kütleli akış hızındaki ve gıdanın özgül ısı kapasitesindeki değişimleri ölçen geri beslemeli kontrol sistemi ile uygulanarak gerçekleştirilir (Tempest 1995). Güç ayarlaması, statik sistemlerde gıda ürününün farklı noktalarından sıcaklık ölçümü alınmak

suretiyle yapılır. Bu doğrultuda kullanılacak olan sıcaklık ölçüm aletleri, yüksek duyarlılıkta olan ve elektrik izolasyonu sağlayan malzemelerle kaplanmış olmalıdır. Yapılan çalışmaların çoğunda 'T' tipi teflonla kaplanmış ısı iletkenlerinin kullanıldığı gözlemlenmektedir (Sastry 1992; Qihua vd 1993; Fryer vd 1993; Sastry ve Salengke 1998). Sastry ve arkadaşları; ısının dağılımı noktasında sıvı kristal tabakalarının, yapılan çalışmalarda ön bilgi anlamında oldukça öneme sahip olduğunu vurgulamıştır (Sastry ve Li 1996). Zira bu yöntemin otomatik kontrol sistemleri üzerinde uygulamaya konulması oldukça güçtür. Ruan ve arkadaşları yaptıkları araştırmada Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) yöntemi ile partikül içeren gıdaların ohmik ısıtma işlemi esnasında sıcaklık dağılımının tespit edilebileceğini göstermişlerdir (Ruan vd 1999). Böylelikle elde edilen görüntüler, partikülün orta noktasındaki sıcaklığın diğer dış bölgelere kıyasla daha üst seviyede olduğunu belirlemiştir. Speller ve arkadaşları ısının ölçümünde Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) yönteminin kullanılması sayesinde 3 boyutlu haritaların elde edilebileceğini ifade etmişlerdir (Speller vd 1999).

Elektriksel özellikler; elektrotlar güç kaynağına bağlanır. Bu güç kaynağının ayarlanabilir voltaj uygulayabilmesi gerekir. Sistemin, ürün hattının yükünden arındırılması için topraklanma işleminin yapılması önemli bir noktadır ve üzerinde çalışılan zeminin mutlak surette izolasyonu temin edilmelidir (Skudder 1989; Tempest 1995).

Mekaniksel özellikler; ohmik ısıtmanın sürekli sistemlerinde ürün akışı çoğunlukla alttan üste doğru olur, bu akış dikey veya eğimli kolonlar yardımıyla gerçekleşir. Böylelikle sisteme hava girişinin önüne geçilmiş olur (Skudder 1989). Ürünün elektriksel iletkenliği sıcaklıkla doğru orantılıdır, sıcaklık arttıkça iletkenlikte artar bu sebeple art arda bağlanan ısıtma kolonları arasında bulunan bağlantı tüplerinin uzunlukları çıkış kısmına yaklaştıkça arttırılmalıdır. Eğer bütün kolonların dolu olması isteniyorsa ısıtıcıların basınç ayarının yapılmış olması gerekir (Tempest 1995, 1996).

Bekletme süresi; pastörizasyon ve sterilizasyon işlem süreleri kısa tutulmalıdır, çünkü elektriksel akımın bazı mikroorganizmalara tek başına zarar verdiği bilinmektedir (Kim vd 1996a; b; Park vd 1997).

Frekans ve dalga boyu; ohmik ısıtma işlemi gerçekleşirken kaliteyi ve verimliliği etkileyen faktörlerden ikisi frekans ve dalga boyudur (Fadl ve Shuli 2014; Silva vd 2017). Bu işlem esnasında alternatif akımın frekans ve dalga boyunu değiştirmek gıda özelliklerinde ve ısı kütle transferinde değişikliklere sebebiyet verir. Bu yüzden frekans ve dalga boyunun ohmik ısıtma üzerine yarattığı etkileri incelemek gerekmektedir (Silva vd 2017).

Gıda endüstrisinde ısıtma numunesi frekansı 50.0'dan 10.000 Hz'ye yükseldiğinde, ısıtma numunesi için 80°C'ye ulaşmak için gereken sürenin yaklaşık altı kat arttığını bildirmiştir

(Lima vd 1999). Amatore ve arkadaşları, tipik olarak düşük frekanslı alternatif akım 50 ile 60 Hz altında geleneksel ohmik ısıtmanın, suyun elektrolizi nedeniyle oksijen ve hidrojen gelişimine neden olabileceğini bildirmişlerdir (Amatore vd 1998).

Tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken parametreler yukarıda verilmiştir. Yukarıda verilen parametrelere istinaden tasarlanan ohmik ısıtma sistemlerinin kullanım alanları ise şöyledir;

1. Evaporasyon
2. Donmuş Gıdaların Çözülmesi
3. Pastörizasyon
4. Vakum Kurutma
5. Haşlama
6. Fermantasyon
7. Ekstraksiyon
8. Pişirme

Ohmik ısıtma ile evaporasyon bunların ilkidir. Evaporasyonun kelime anlamı buharlaşmadır. Ohmik ısıtma ile evaporasyon ve geleneksel yöntem (vakum) ile evaporasyonun gıda ürünlerinin kalitesi üzerine etkilerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Geleneksel evaporasyonda gıdanın renginde ve aromasında kayıplar oluşur. Vizkozite arttıkça iletkenlik azalır ve bu sebeple çok uzun zaman alan bir işlem olur. Ohmik ısıtma ile buharlaştırma işleminde ise ürünler daha açık renkte ve gıdanın aromasındaki azalma geleneksel yönteme kıyasla daha azdır. Daha kaliteli ürünlerin elde edildiği aşıkardır.

Her iki yöntemle taze portakal suyu üzerinde çalışma yapılmıştır. Çalışmada iki yöntemin de ilk 40 dakikasında ohmik ısıtmanın suyu meyve suyundan 3 kat daha fazla ayırabilmesine dikkat çekilmiştir. Aynı zamanda ohmik ısıtma esnasında ürünün artan vizkozitesi buharlaşma hızını etkilememektedir. Sonuç olarak her iki işlem teknolojisi ile yüksek ürün kalitesi ve yüksek buharlaştırma hızı elde etmek mümkündür.

İkinci olarak ohmik ısıtma donmuş gıdaların çözülmesinde kullanılmaktadır. Çözülen gıdada mikroorganizmaların veya mikropların oluşmasına engel olmak için donmuş gıdaların çözülmesi işlemi, çok hızlı bir şekilde mümkün olan en düşük sıcaklık seviyesinde yapılmalıdır. Eğer çözülme işleminde süre uzaması ya da kritik sıcaklıkların üzerine çıkılması ile karşı karşıya kalınırsa gıdanın ilk olarak çözülen kısımlarında mikroorganizmaların veya mikropların arttığı görülür. Çözülme işlemi esnasında katı fazdan sızan ve çözünebilir proteinler ile diğer

besin ögelerinden kaynaklanan besin kaybı geleneksel çözülme yönteminin dezavantajlarından biridir. Bir diğeri ise, işlem sırasında oluşan çok miktardaki atık sudur.

Buna karşılık ohmik ısıtma ile çözülme yönteminin dayandığı prensip, belirli bir dirence sahip gıda ürününden elektrik akımının hızlıca geçmesidir. Gıdanın her bölümüne akım dağılır ve böylelikle uğradığı dirençle orantılı olarak ısınma oluşur. Bunun sonucunda; geleneksel yönteme kıyasla aynı derecede sıcaklığa ulaşmak için tekrar edilen işlemin sayısı az olur. Elde edilen kalite daha yüksektir. Özellikle et ürünlerinde bu yöntemin tercih edildiği görülmektedir.

Bir diğeri ise pastörizasyondur. Ohmik ısıtma ile pastörizasyon mümkündür. Pastörizasyon ve sterilizasyon gibi farklı ısı işlemlerin yapılmasındaki asıl amaçların başında gıdayı mikroplardan ve mikroorganizmalardan korumak gelir. Bu korumanın sağlanabilmesi için yapılması gereken en önemli şey gıdanın ısıyla karşı karşıya kalma süresinin çok iyi ayarlanmasıdır. Eğer bu süre ihtiyaç duyulan ısı seviyesini aşarsa besin ögelerinin bozulmasına sebebiyet verir.

Ohmik ısıtmanın daha kaliteli, tehlikesiz ve güvenilir gıda ürünlerinin üretilmesinde alternatif teknolojilerin ilk sıralarında yer almasının asıl nedeni hızlı ve tek tip ısı akışı sağlayan bir sistemin uygulanmasıdır. Bunun yanı sıra direkt ohmik ısıtmanın bazı negatif etkileri görülmektedir. Bunlar; özellikle sıvı gıdalarda bozulma ve elektrot materyaller gibi ekipmanlarda ortaya çıkan aşınma, paslanma ve çürümedir.

Ohmik ısıtma vakumla kurutma alanında da kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemle veya mikrodalga yöntemle ısıtılmış gıdalara kıyasla ohmik ısıtma işlemi ile ısıtılmış meyve ve sebze dokularındaki kuruma hızı daha fazla olur. Buna bağlı olarak da ürün yüzeyine tutunan taneciklerin ayrılması anlamına gelen desorbsiyonun izotermi değişiklik gösterir. Bu yöntem sayesinde kurutma süresinde önemli ölçüde düşüş sağlanmıştır. Böylelikle bu yöntem maliyeti düşük olarak nitelendirilmekte ve ürünün kalitesi çok iyi seviyeye çıkmaktadır.

Ohmik ısıtmanın mümkün olduğu bir başka alan ise haşlamadır. Ohmik ısıtma, sebze türü gıdaların işlenmesinde hızlı haşlama elde etmek için yöntem açısından önemli bir seçenektir. İşlem için örnek sebze olarak brokoli seçilmiş ve bu sebze hem ohmik ısıtma ile haşlanmış hem de su ile haşlanmıştır. Bu iki metot karşılaştırıldığında; su ile haşlandığında 85-100°C sıcaklıklarına ulaşıldığı, ohmik ısıtma ile haşlama yapıldığında ise 25-40 V/m akım ile 85°C ye ulaşıldığı gözlemlenmiştir (Katrokha vd 1984).

Diğer bir alan fermantasyondur. Ohmik ısıtma ile fermantasyon işlemi gerçekleştirilebilir. Geleneksel yöntemle kıyaslandığında ohmik ısıtma ile ısı elde edildiğinde işlemle sonuç arasındaki zaman farkı ya da tepki süresi anlamına gelen lag periyodunun %94'ün altına indiği

görülmektedir (Tian vd 2018). Bakteri gelişmesinin ilk aşamalarında elektrik akımının etkisi artırma yönünde olmasına rağmen bir sonraki aşamaları engelleyici durumundadır. Geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında ohmik ısıtma yönteminde fermantasyona bağlı olarak oluşan ortamın pH'sı daha yüksek seviyede ölçülmüştür. Bunun yanı sıra bakterilerin diğer bakterileri öldürmek için ürettikleri zehirli protein ya da doğal antimikrobiyal maddeler anlamına gelen bakteriosin aktivitesi daha düşük seviyede olduğu görülmektedir.

Ohmik ısıtma, fermantasyon işlemine yönelik uygulamalarda daha işe yarar olarak nitelendirilmesine rağmen henüz yaygın kullanma anlamında istenilen noktaya ulaşmamıştır. Bunun nedeni de verim konusunda yaşanan düşüştür.

Ekstraksiyon alanında da ohmik ısıtma kullanılmaktadır. Ohmik ısıtmanın ayırma-ayırıştırma işlemi üzerindeki etkisinin çok önemli olduğu yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur. Buna bir örnek vermek gerekirse; ohmik ısıtma uygulamasıyla şeker pancarından şekerin ayrıştırılmasına yönelik faaliyetin arttığı tespit edilmiştir (Katrokha vd 1984).

Lima ve arkadaşları yaptıkları araştırmada, ohmik ısıtma işlemine tabi tutulan elmalardan elde ettikleri elma suyunun verimliliğinin yüksek seviyede olduğunu ve bunun yanı sıra alternatif akım frekanslarının azalmasıyla verimliliğin önemli derecede arttığını gözlemlemişlerdir (Lima ve Sastry 1999).

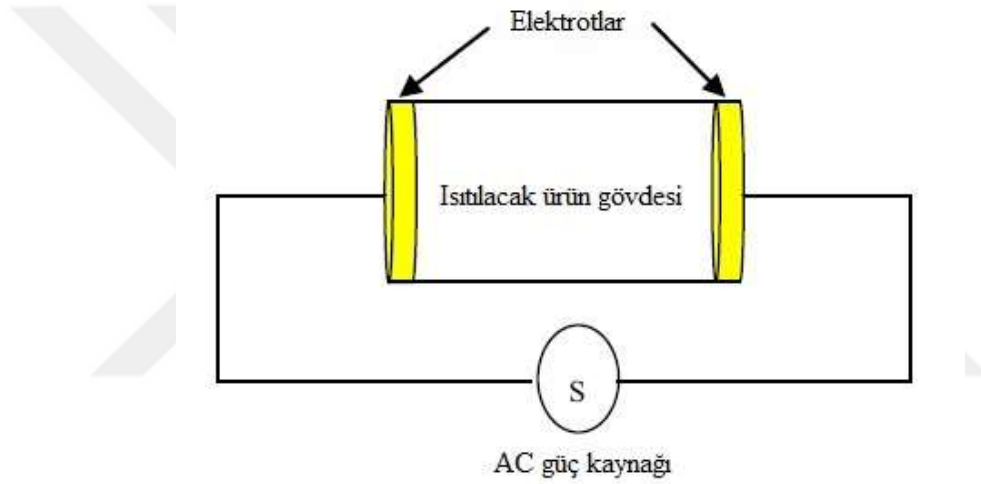
Son olarak ohmik ısıtma pişirme alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ohmik ısıtma ve geleneksel yöntem birleştirilerek bütün bir hindi pişirilmiş bir diğer geleneksel yöntem olan buharla pişirme ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler uygulanırken LTLT (düşük sıcaklık-uzun süre) ve HTST (yüksek sıcaklık-kısa süre) yöntemleri birlikte kombine halde kullanılmıştır. Geleneksel yöntemle pişirilenlerle karşılaştırıldığında ohmik ısıtma yöntemiyle pişirilen ürünlerin daha açık renkli ve benzer yapıda oldukları gözlemlenmiştir (Zell vd 2010). Ohmik ısıtma ve HTST işlemi yapılan ürünlerde kısa sürede yüksek sıcaklıklara erişilmesi sonucunda yüksek seviyede su kaybı meydana gelmiştir. Bu yüzden herhangi bir dokuyu belirleyen kendine özgü yapı ya da doku örgüsü anlamına gelen tekstür ortaya çıkmıştır (Zell vd 2010). Su kaybına sebebiyet veren, kısa sürede yüksek sıcaklığa erişilmesidir. Bu da daha fazla ağırlık kaybı anlamına gelir.

Prensipler

Joule ısıtıcı olarak da bilinen ohmik bir ısıtıcı, ısıyı üretmek için sıvının kendi elektrik direncini kullanan bir elektrikli ısıtma cihazıdır. Isı, alternatif elektrik akımı (I) iletken bir direnç malzemesinden (R) geçerken Joule ısıtması ile doğrudan sıvının içinde üretilir ve sonuç olarak enerji üretimi sıcaklık artışına neden olur. Şekil 2 ohmik ısıtmanın prensiplerini

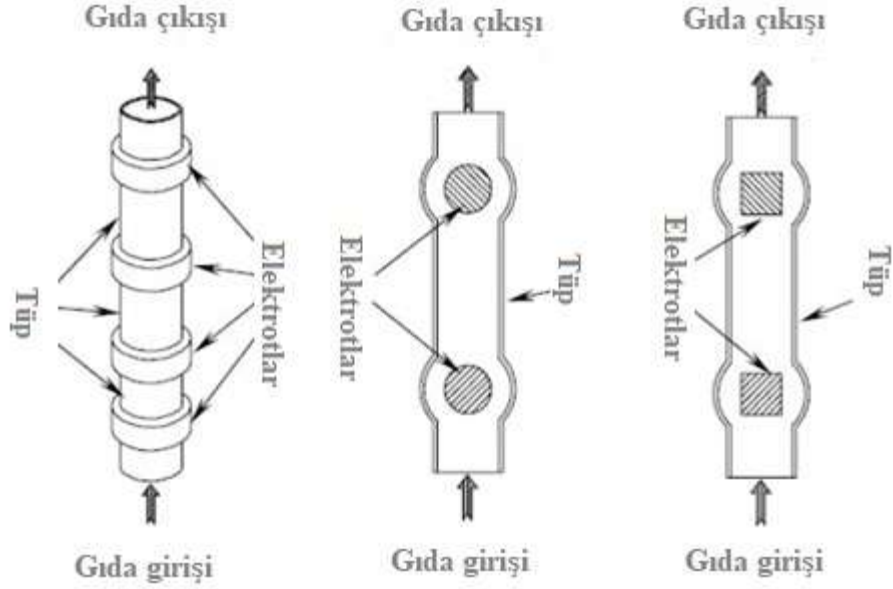
göstermektedir. Sıvılar için en yaygın kullanılan ısıtma teknikleri, sıcak bir yüzeyden ısı transferine dayanır. Bu ısı doğrudan bir elektrikli ısıtma elemanı vasıtasıyla veya dolaylı olarak bir ısı eşanjörü (örn. kabuk ve boru, plaka) vasıtasıyla sıcak bir ortamdan (örneğin buhar) üretilebilir.

Bu yöntemler ısıyı işlem sıvısına aktarmak için bir sıcaklık gradyanı gerektirir ve bu nedenle yüzeyler üründen daha yüksek bir sıcaklıktadır. Bu, sıcak yüzeyler üzerinde yanan belirli ürünler için yüzeylerin kirlenmesine neden olarak ısı transfer oranlarını azaltır ve ürünü olumsuz etkiler. Isı transferi ile ilgili başka bir sorun, akışkanlığı oldukça az olan sıvı ve partiküllü sıvıların ısı transferinin gerçekleştirilmesinin zor olduğu yerlerde ısıtılmasıyla ortaya çıkar. Ohmik ısıtıcılar, sıvıların ısıtılmasında sıcak yüzeyleri uzaklaştırarak yukarıda belirtilen sorunları çözer (Fadl ve Shuli 2014).



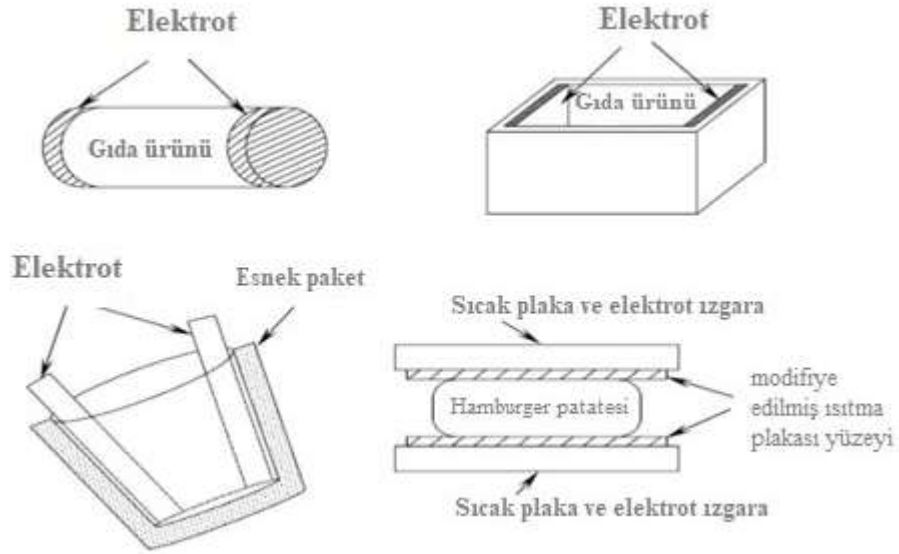
Şekil 2. Şematik diyagram ohmik ısıtma prensibini göstermektedir.

Ohmik ısıtma sistemlerinde çeşitli elektrot tipleri kullanılmaktadır. Yüzük tip elektrotlar, dairesel dirsek elektrotlar, kare dirsek elektrotlar olmak üzere 3'e ayrılır. Bu elektrotların şekilleri ohmik ısıtma düzeneklerindeki yerleşimleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



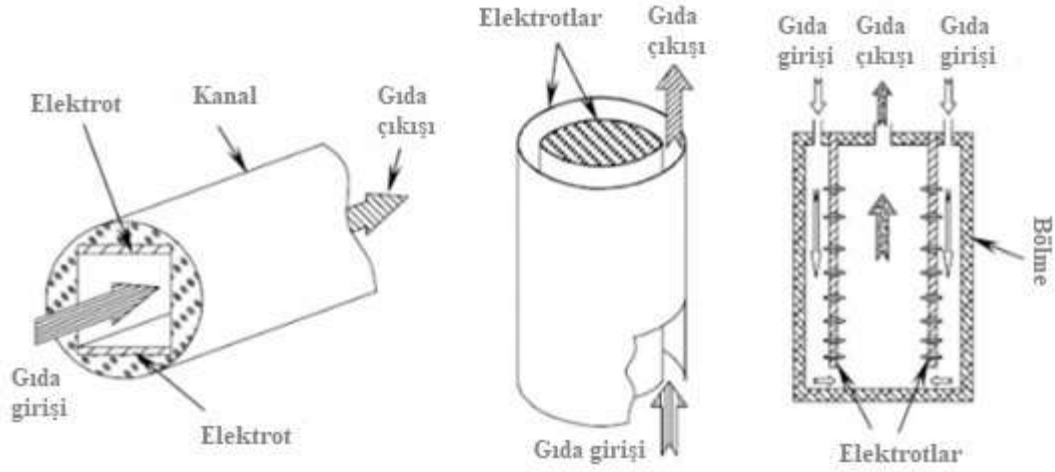
Şekil 3. Ohmik ısıtma sistemlerinde elektrot tipleri

Ohmik ısıtma proseslerinde elektrotlar için çeşitli yerleşim şekilleri tercih edilmekte olup bunlardan silindir, kübik kutu, esnek kaplama ve ızgara yüzey tipi yerleşim en çok tercih edilenlerdir. Bunların şekilsel gösterimi Şekil 4'te verilmiştir;



Şekil 4. Ohmik ısıtma sistemlerinde elektrot yerleşim şekilleri

Sürekli ohmik ısıtma sistemlerinde kullanılan elektrot yerleşim düzenekleri içerisinde düzlemsel elektrotlar, aynı eksene yerleştirilmiş elektrotlar, aralıklı yerleştirilmiş elektrotlar gibi çeşitli elektrot yerleşim şekilleri bulunmaktadır. Bu yerleşim şekilleri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Ohmik ısıtma sistemlerinde elektrot yerleşim düzenekleri

Matematiksel Modelleme

Ohmik ısıtma güç dönüştürücüsünün tasarım gereksinimleri, aşağıda kısaca ele alınan uygulama parametrelerinden kaynaklanmaktadır. Tipik değerler ve ilgili gereklilik aralıkları Tablo 2'de verilmektedir. Gıda maddesi işleme hatlarının çalışma kapasitesi y 'nin belirlenmesi, ürün verimi açısından kısıtlamalar bağlamında ekonomik tedbirlerle orantılıdır. Bu birincil parametre, işlenmiş parçacık boyutu (varsa), teknolojik kolaylık ve makine maliyeti, belirlenen boru çapı ve sonuç olarak ortaya çıkan bölüm (S) ile bağlantılıdır. İşlenmiş yiyeceğin yoğunluğu ρ biliniyorsa, borunun iç kısmındaki hızı $b = y / (\rho S)$ belirlemek mümkündür. Bu parametreler tipik aplikatör boyutlarını belirler, çünkü elektriksel güvenlik ve ısı homojenliği gibi sebeplerden dolayı hat içi uygulama (sıvı akışına göre) tercih edilir (Varghese vd 2014; Sack vd 2017). Aplikatörün uzunluğu L , genellikle tasarımcı için bir serbestlik derecesini temsil eder. Ohmik ısıtma için bir başka önemli özellik, işlenmiş malzemenin elektriksel iletkenliği ve sıvının kendisinin sıcaklığına nasıl bağlı olduğudur. İlgili gıda endüstrisi maddelerinin genellikle elektrik iletkenliklerinin artan sıcaklıkla birlikte büyüdüğü bilinmektedir (Skudder ve Stirling 1992; Icier ve Ilicali 2005; Sarang vd 2008) eşzamanlı olarak, birçok literatür çalışması (Morren vd 2003; Samaranayake vd 2006; Sarang vd 2008; Varghese vd 2014)'de bildirildiği gibi tipik iletkenlik değerlerini incelemiştir. Sıcaklığa bağlı iletkenlik, $\sigma(T) = \sigma_0 + \alpha T$ olarak tarif edilir; burada T , mutlak sıcaklıktır, α , iletkenliğin sıcaklık katsayısı varsayılan sabit değer ve σ_0 , mutlak sıfırda bilinen verilere göre tahmin edilen iletkenliktir; oda sıcaklığı iletkenliği $\sigma_{\alpha} = \sigma(T_{\alpha})$ 'dır, $\sigma_0 = \sigma_{\alpha} - \alpha(T_{\alpha})$ olarak hesaplanır. Tablo 2'de bildirilen iletkenlik aralığı, literatürden elde edildiği gibi ohmik ısıtma tarafından geniş bir sıcaklık aralığında işleme tabi tutulacak olası tüm yiyecekleri kapsar. Tipik α değerleri Tablo.2' den elde edilebilir (Sarang vd 2008).

Tablo 2. Gıda İşlemede Kullanılan Parametrelerin Tipik Değerleri ve Aralıkları

Nicelik	Sembol	min	max	birim
Kapasite	y	2	12	ton/h
Boru çapı	d	50	140	mm
Aplikatör uzunluğu	L	200	1000	mm
Aplikatör alanı	S	1960	15390	mm ²
Yoğunluk	ρ	800	1500	kg/mm ³
Özısı	c	0.84	4.1	kJ/(kgK)
Hız	b	0.087	7.64	km/h
Elektriksel iletkenlik	σ	0.05	5	S/m
İletkenlik katsayısı T	α	2	13	mS/(mK)
Direnç (teorik)	R_T	2.5	10180	Ω
Direnç (akıllı)	R_S	102	260	Ω
Direnç (pratik)	R	2.5	260	Ω
Voltaj	V_{rms}	70	3800	V
Sıcaklık değişimi	ΔT	4.1	128	K

Ohm yasasından yola çıkarak, uygulayıcı ile birlikte sabit iletkenlik hipotezi altında, dönüştürücüde görüldüğü ve eşitlik (1) 'de gösterildiği gibi teorik direnç aralığını belirlemek mümkündür (l minimum'u, h ise maximum'u niteler).

$$R_{T,l} = \frac{L_l}{\sigma_h \cdot S_h}, R_{T,h} = \frac{L_h}{\sigma_l \cdot S_l} \quad (1)$$

Bu, çok geniş bir aralıkla sonuçlanır ($\approx 4000 \times$). Aplikatör boyutunu üründen ürüne değiştirmek mümkün olduğunda, bir "akıllı" aralık elde edilebilir.

$$R_{S,l} = \frac{L_h}{\sigma_h \cdot S_l}, R_{S,h} = \frac{L_l}{\sigma_l \cdot S_h} \quad (2)$$

Bu, aralık genişlemesini önemli ölçüde azaltır, ancak son aşamada bir kesit değişikliğine ihtiyaç duyulması noktasında ciddi anlamda sınırlama getirebilir. Bu nedenle, kesitin değişmemesi için kesitin kısıtlanması uygundur. Termal açıdan, S / L oranı $\Delta T = T_o - T_i$ sıcaklık değişimini en üst düzeye çıkarmak için önemlidir (Çıkış sıcaklığı T_o , giriş sıcaklığı T_i). Bu oran, temel ilkelerden başlayarak elde edilen diferansiyel denklemin (3) entegrasyonu ile hesaplanmaktadır (Ramos ve Tacca 2013).

$$\frac{dT}{dl} = \frac{\sigma(T)E_{rms}^2 S}{cy} \quad (3)$$

Bu entegrasyonun sonucu eşitlik (4) 'te yer almaktadır, burada c , yiyeceğin özgül ısıdır ve farklı gıdalar için bu özgül ısılar (Anonim 2013) makalede mevcuttur. E_{rms} , RMS elektrot voltajı V_{rms} ve aplikatör uzunluğu L tarafından belirlenen, aplikatör içindeki elektrik alanın RMS (efektif) değeridir. $E_{rms} = V_{rms} / L$ gibi

$$\Delta T = \frac{\sigma(T_i)}{\alpha} \left[\exp\left(\frac{\alpha V_{rms}^2 S}{cy L}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

Yukarıdaki denklem, tasarımla ilgili tüm parametreleri kapsar ve değişken iletkenlik nedeniyle aplikatör ile birlikte üstel sıcaklık dağılımının bir sonucudur. İşlem sırasında, elektriksel iletkenliğin ihmal edilebilir değişikliği durumunda, yani, $\sigma(T_i) \sim \sigma(T_o)$, $\alpha \rightarrow 0$ ile limit işleminin kullanılmasıyla, boru boyunca doğrusal bir sıcaklık dağılımı ile daha yaygın olana (eşitlik 5) geri döner.

$$\Delta T = \frac{\sigma(T_i) V_{rms}^2 S}{cy L} = \frac{V_{rms}^2}{R_{eq0}} \frac{1}{cy} = \frac{P}{cy} \quad (5)$$

Hem denklem (4) hem de denklem (5) 'te sıcaklık değişimi, diğer parametreler sabitlenir sabitlenmez S / L maksimizasyonu ($S / L = S_h / L_l$) ile maksimize edilir; bu doğal olarak eşitlik (6)' da açıklanan pratik direnç aralığına yol açar. Tasarımın aşağıdaki aşamalarında kullanılır.

$$R_l = R_{T,l}, R_h = R_{S,h} \quad (6)$$

Denklemler (4) ve (5), ($\alpha = 0$) sıfır iletkenlik sıcaklık bağımlılığı ($\alpha \rightarrow 0$, basitleştirilmiş durum) durumunda sıcaklık değişimini tarif eder. İkisinin oranı, gerektiğinde hem basitleştirilmiş modeli kullanmadaki hatayı belirlemek hem de eşdeğer aplikatör direncini (1), (2) ve (6) denklemlerinde yapılanlardan daha doğru hesaplamak için kullanılabilir. Böylece ohmik ısıtmayı tanımlayabiliriz.

İletkenlik Düzeltme Katsayısı (OHC³) r

$$r = \frac{\Delta T_{(4)}}{\Delta T_{(5)}} = \left[\exp\left(\frac{\alpha V_{rms}^2 S}{cy L}\right) - 1 \right] \left(\frac{\alpha V_{rms}^2 S}{cy L}\right)^{-1} \quad (7)$$

Aplikatörün belirli değerinde (l), gıda maddesinin içinde dağılan son derece küçük güç şudur;

$$dP = \sigma E_{rms}^2 S dl = \sigma(T(l)) \frac{V_{rms}^2 S}{L^2} dl \quad (8)$$

Aplikatör P içinde üretilen elektrik gücünü hesaplamak mümkündür.

$$P = \frac{cy\sigma(T_i)}{\alpha} \left[\exp\left(\frac{\alpha V_{rms}^2 S}{cy L}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

P ayrıca elektriksel olarak $P = V_{rms}^2/R_{eq}$ olarak da ifade edilebilir, burada R_{eq} , ohmik ısıtmada görülen eşdeğer dirençtir. Bunun sonucunda,

$$R_{eq} = \frac{1}{r} \frac{L}{\sigma(T_i)S} = \frac{R_{eq0}}{r} \quad (10)$$

burada sabit iletkenlik göz önünde bulundurularak geometrik olarak hesaplanan eşdeğer direnç (R_{eq0}), α katsayısına bağımlı bir faktörle doğrulanır. Elektrot voltajı da sınırlandırılmalıdır. Üst bölümde aralık, esas olarak yalıtım nedenleriyle sınırlıdır; $P < P_h$ ile birlikte bir $V_{rms} < V_h$ limiti, en yüksek yük direncinde ($R_{eq} = R_h$) ulaşılabilecek minimum ΔT_l ile sonuçlanır.

$$\Delta T_l = \frac{\min(V_h^2/R_h; P_h)}{c_h y_h} \quad (11)$$

Bu parametre, hedef sıcaklık değişikliğine ulaşmak için çok sayıda ısıtıcıya ihtiyaç duymadan, yeterli maliyet ile ohmik ısıtıcı tarafından işlenebilecek gıda tiplerini değerlendirmek için önemlidir. Aşağıdaki donanım tasarımı ve dönüştürücünün minimum kontrol edilebilir çıkış voltajı için bir sınır belirlemek üzere en düşük pratik voltaj değerini tahmin etmek fayda sağlar. Hedef ΔT_l verildiğinde, minimum voltaj değeri $V_{rms,l}$, en düşük gıda direnci için (5) 'in ters çevrilmesiyle elde edilir.

$$V_{rms,l} = \sqrt{\Delta T_l c_l y_l R_l} \quad (12)$$

Anahtarlama frekansı f_{sw} ve dönüştürücünün dalga şeklinin uygun seçimi de önemlidir. Çünkü alıcı için hem sistem performansını (elektrot korozyonu ve kirlenme) hem de tasarım kompaktlığını (pasif cihazların hacmi, yani transformatör) etkiler. Düşük frekanslı (50-60 Hz) sinüzoidal voltajların kullanıldığı ohmik ısıtmanın ilk aşamalarından farklı olarak (Skudder ve Stirling 1992), bipolar darbelerin kullanılması şartıyla günümüzde dikdörtgen darbelerle bile yüksek frekansların elektrot korozyonunu en aza indirebileceği bilinmektedir (Samaranayake vd 2006; Varghese vd 2014), Birçok ohmik ısıtma cihazının günümüzde 10-60 kHz frekanslarında POH cihazları olmasının nedeni budur.

Çalışmalarda, güç anahtarlama nedeniyle nispeten yüksek voltajlar ve elektrik alan değerleri (Morren vd 2003), iyi derecede pasif yoğunluk ve sınırlı verimlilik kaybı olsa bile, çift katmanlı deşarj ile uyumlu olması için ve düşük korozyonu garanti etmek için $f_{sw} = 30$ kHz ara değer kullanımı uygun görülmüştür.

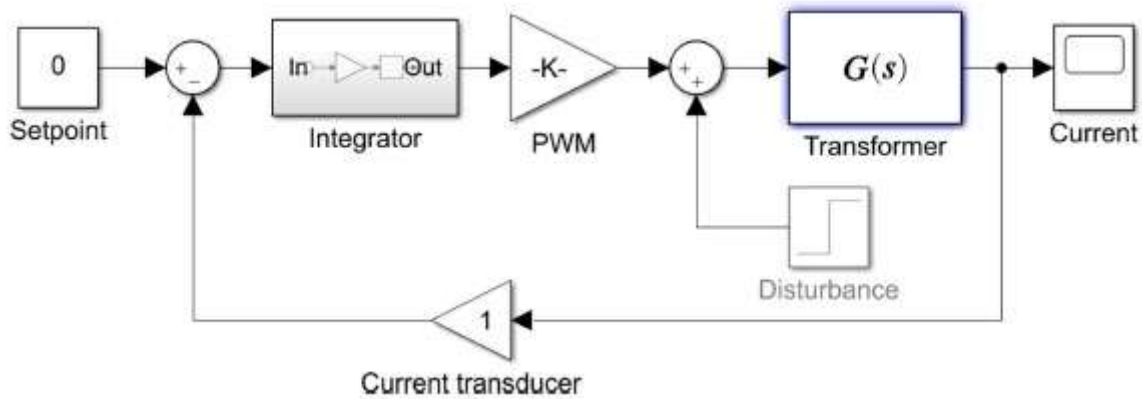
Ohmik Isıtma Sistemi İçin Kontrolcü Tasarımı

Güç dönüştürücünün kaçınılmaz asimetrisi nedeniyle, transformatörün primerini besleyen bipolar dalga biçiminin bir dc bileşeni varsa, transformatörün birincil sargısında nispeten yüksek bir dc akımı akabilir, ek joule kayıpları üretir ve manyetik çekirdeği doygunluğa doğru sürer. Dc bileşeninin etkisinden kaçınmak için farklı stratejiler benimsenebilir. En basiti, transformatörün birincil sargısı ile seri olarak uygun bir kondansatör koymaktır. Bu çözümün dezavantajı, yüksek akımlı uygulamalar için birçok kapasitörün paralel bağlanması gerekmesidir, bu da dönüştürücü boyutunu, ağırlığını ve maliyetlerini artırır.

Alternatif bir çözüm, dc bileşeninin kapalı döngü kontrolü ile H-köprü modülasyonunu ayarlamaktır. Dc bileşeni için transformatör eşdeğer devresi basit bir direnç olduğundan, gerilim veya akım dc bileşeni sıfıra kontrol edilebilir (Carpita 1994; Bowtell ve Ahfock 2010). Önerilen dönüştürücü, trafo girişindeki dc akımı kontrol eden bu stratejiyi benimser. Bu amaçla, trafo giriş akımı, kompanzasyonlu Hall etkili akım dönüştürücüsü ile ölçülür. Dönüştürücü çıkışı filtrelenir, daha sonra hem pozitif hem de negatif darbelerin arasında örneklenir ve herhangi bir dalgalanmayı önlemek amacıyla bu iki örneğin ortalaması alınır. Bu şekilde elde edilen dc bileşeni, modülasyonu ayarlayan, akımın dc bileşenini ve dolayısıyla voltajın dc bileşenini sıfıra ayarlayan bir kontrol döngüsünü besler.

Bu stratejinin doğruluğunu kanıtlamak için MATLAB/Simulink kullanılarak basitleştirilmiş bir analitik model Şekil 6'da verildiği gibidir. Bu model, yalnızca sargı parazit direncinin ve mıknatıslanma endüktansının dahil edildiği, yani, indirgenmiş sıralı bir transformatör modeli eşitlik (13)' te verildiği şekildedir.

$$G(s) = \frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{sL_{mu} + R_L}{s^2 L_d L_{mu} + (L_{mu} R_L + L_{mu} L_d + L_d R_L) s + R_d R_L} \quad (13)$$



Şekil 6. DC akım kontrol döngüsünün basitleştirilmiş analitik modeli

Birincil tarafta bulunan yük, mıknatıslanma endüktansına paraleldir. Sistem, iki kutuplu ve bir sıfırlı ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu ile oluşur. Giriş bozukluğundan çıkış dc akımına transfer fonksiyonu göz önüne alındığında, kapalı döngü işleminde orijinde bir sıfır daha ortaya çıkar; bu durumda bir dc bileşeni reddine sebebiyet verir.

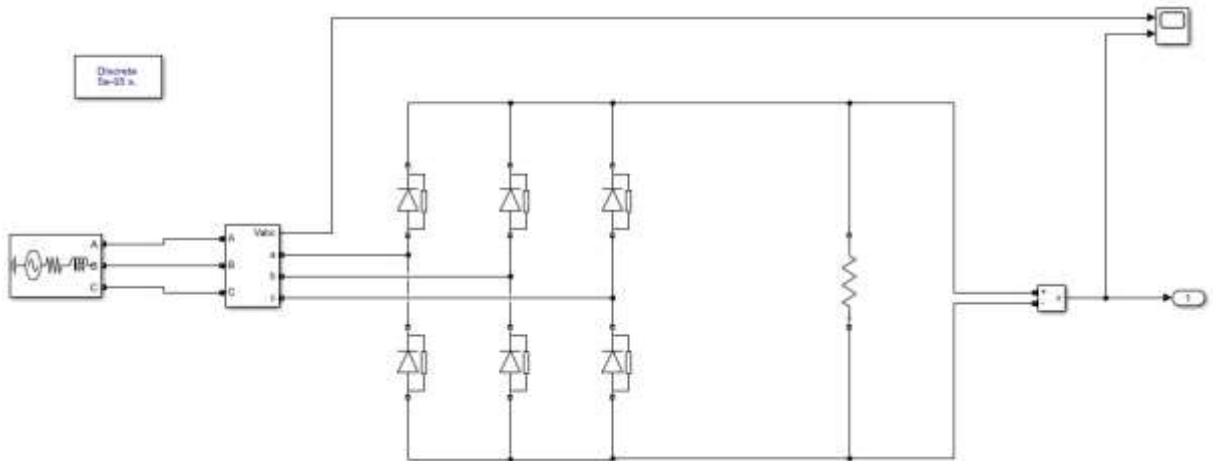
H-köprüsünün güç kaynağı, üst üste binen belirli bir dalgalanma ile sabit bir bara voltajı üreten üç fazlı bir doğrultucudan elde edilir. Büyük bir kapasitör bu dalgalanmayı azaltabilir; bu çözümün dezavantajı, kapasitörün maliyetli olması ve aynı zamanda dönüştürücü devreye girdiğinde akımı sınırlamak için bir ön şarj devresine ihtiyaç duyulmasıdır. Alternatif bir çözüm, bu dalgalanmanın çıkış voltajı (Enjeti ve Shireen 1992; Carpita 1994) üzerindeki etkisini ileri beslemeli olarak telafi etmektir. Tasarlanan dönüştürücü, minimum kapasitans değerine uygun ve her türlü ön şarj devresinden kaçınacak şekildedir.

Bara voltajı $v_{bara}(t)$ yüksek frekanslı örneklenir ve bir LPF (alçak geçiren filtre) kullanılarak ortalama bir v_{ort} değeri elde edilir. Tanımla;

$$a(t) = \frac{v_{bara}(t) - v_{ort}}{v_{ort}} \quad (14)$$

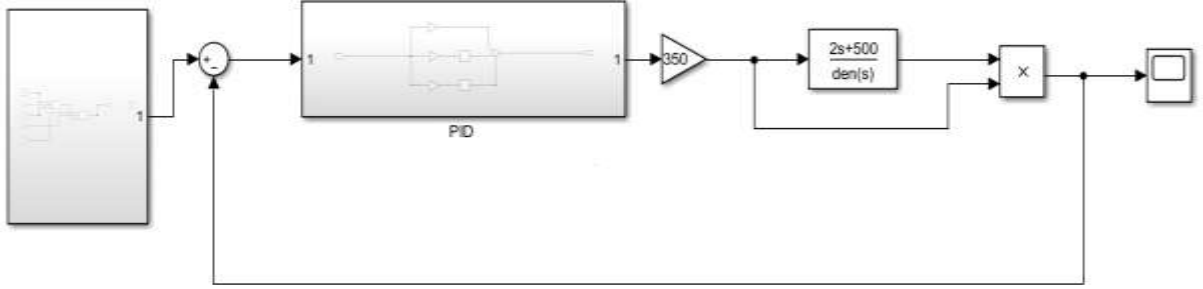
aşağıdaki ifade elde edilebilir:

$$v_{bara}(t) = [1 + a(t)] \cdot v_{ort} \quad (15)$$



Şekil 7. Sistemde kullanılan 3 fazlı köprü doğrultucu

Transformatörün birincilden ikincile yüksek geçiş özelliği, endüktansın güç kontrolü üzerinde kararlı hal etkilerini önler. Önerilen model, güç adımı tepke davranışının simüle edilmesini sağlar.



Şekil 9. Basitleştirilmiş güç kontrol döngüsü MATLAB/Simulink modeli

Bu ohmik ısıtıcı için PID denetleyici göz önüne alınmıştır. PID denetleyicinin kontrol parametrelerinin doğru seçilmesi hayati önem taşımaktadır. Aksi halde kontrol etmek istenilen proses daha da kararsız hale sürüklenebilir. Bu tez çalışmasında göz önüne alınan ohmik ısıtıcı için tasarlanan PID denetleyicinin parametreleri K_p , K_d , K_i Ziegler Nichols Metodu ile optimize edilmiş ve tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Ziegler-Nichols yöntemi, bir PID denetleyicisinin parametrelerini bulmaya yarayan ampirik bir yöntemdir. John G. Ziegler ve Nathaniel B. Nichols tarafından geliştirilmiştir. PID kontrolörün I (integral) ve D (türev) kazançlarını sıfıra ayarlayarak gerçekleştirilir. "P" kazanç K_p , sıfırdan kontrol döngüsünün çıkışının kararlı salınımlara sahip olduğu nihai kazanç K_u 'ya ulaşana kadar artırılır. K_c kritik değerini nihai kazanç olan K_u olarak işaretleyin. K_u ve salınım periyodu T_u daha sonra kullanılan kontrolör tipine ve istenen davranışa bağlı olarak P, I ve D kazançlarını ayarlamak için kullanılır.

Birinci dereceden sistemler için kullanılamamaktadır. Çünkü K_d 'den gelecek s çarpanı ve K_i 'den gelecek 1/s çarpanı birleşince sistem doğrudan ikinci tip sisteme girmektedir. Yani eğer denetim biçimi P, PI ya da PD ise bu yöntem kullanılamaz. Bunun yerine deneme yanılma yoluyla en uygun parametreler seçilebilir. Sonuç olarak Ziegler Nichols yöntemi iki ve üstü dereceli sistemler için kullanılır.

Tablo 3. Ziegler Nichols Metodu ile parametre değerleri

Kontrol Tipi	K_p	T_i	T_d	K_i	K_d
P	$0.5K_u$	-	-	-	-
PI	$0.45K_u$	$0.8T_u$	-	$0.54K_u/T_u$	-
PID	$0.8K_u$	-	$0.125T_u$	-	$0.10K_uT_u$
Klasik PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$	$1.2K_u/T_u$	$0.075K_uT_u$
Pessen İntegral Kuralı	$0.7K_u$	$0.4T_u$	$0.15T_u$	$1.75K_u/T_u$	$0.105K_uT_u$
Aşımli	$0.3\bar{3}K_u$	$0.5T_u$	$0.3\bar{3}T_u$	$0.6\bar{6}K_u/T_u$	$0.1\bar{1}K_uT_u$
Aşımatsız	$0.20K_u$	$0.5T_u$	$0.3\bar{3}T_u$	$0.40K_u/T_u$	$0.06\bar{6}K_uT_u$

Bu alışmada klasik PID kontrol tipi kullanılmaktadır. Aşağıdaki denklemler ile kazanç değerleri ve periyodik değerler hesaplanmaktadır.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (20)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (21)$$

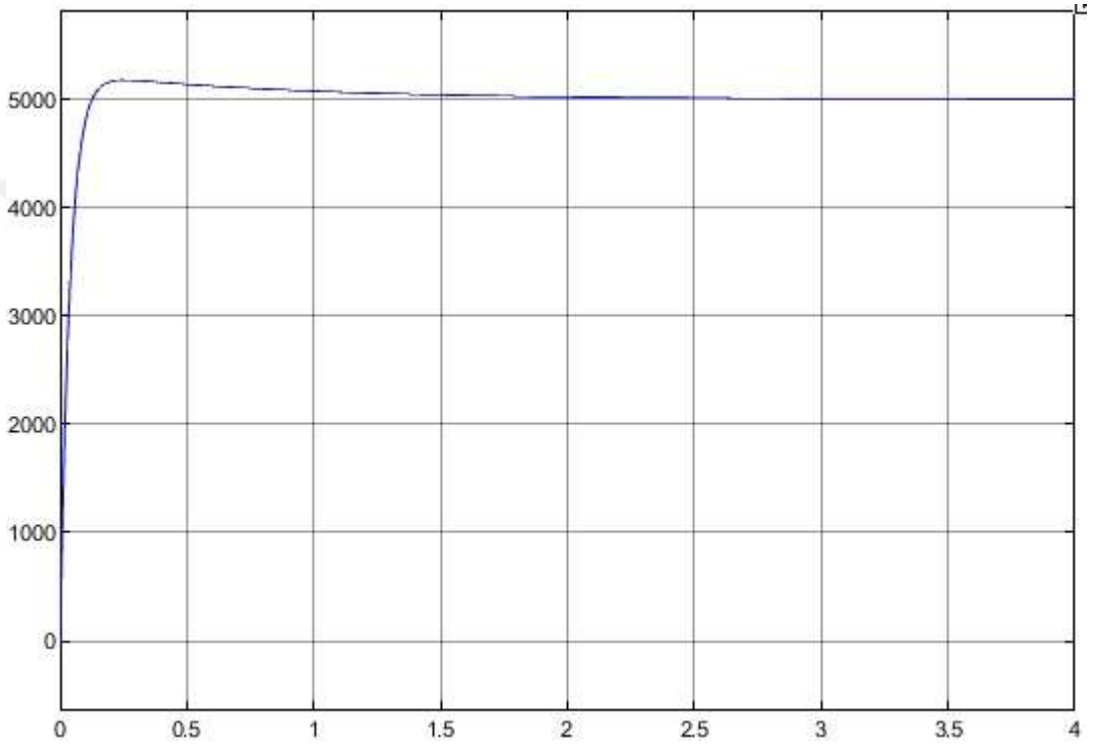
$$T_i = \frac{T_u}{2} \quad (22)$$

$$T_d = \frac{T_u}{8} \quad (23)$$

$$K_c = \frac{K_u}{1.7} \quad (24)$$

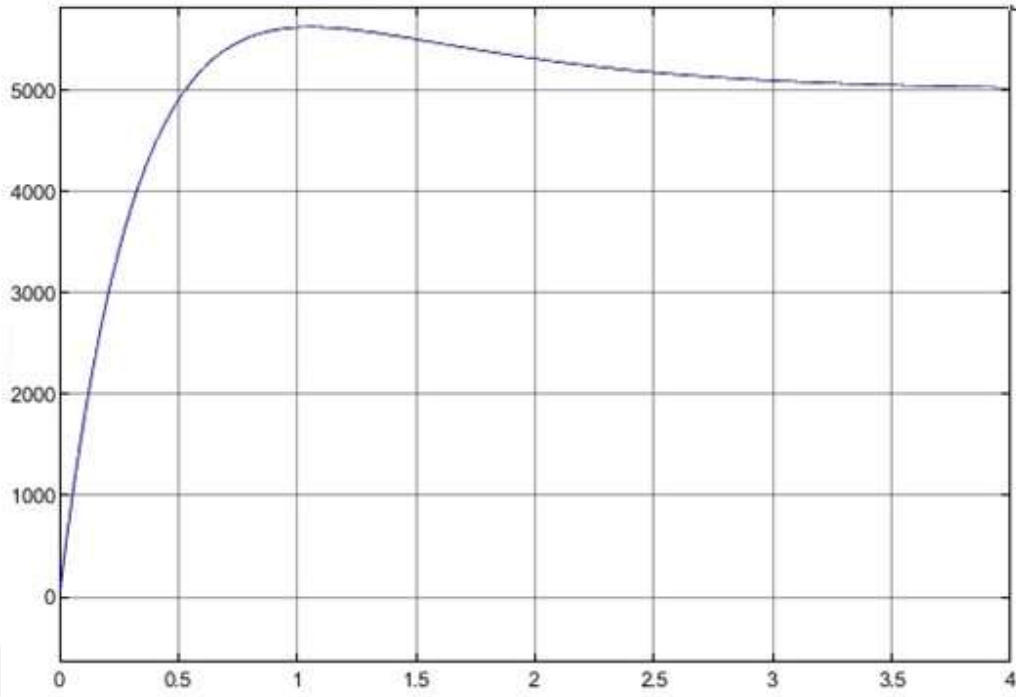
ARAŞTIRMA BULGULARI

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi ohmik ısıtıcı için tasarlanan PID denetleyicinin parametreleri Ziegler Nichols Metodu ile optimize edilmiş ve $K_p = 300$ $K_i = 350$ $K_d = 10$ olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerlere karşılık girişteki 5kW'lık basamak fonksiyonu için çıkışın değişim grafiği Şekil 10'da verilmiştir.



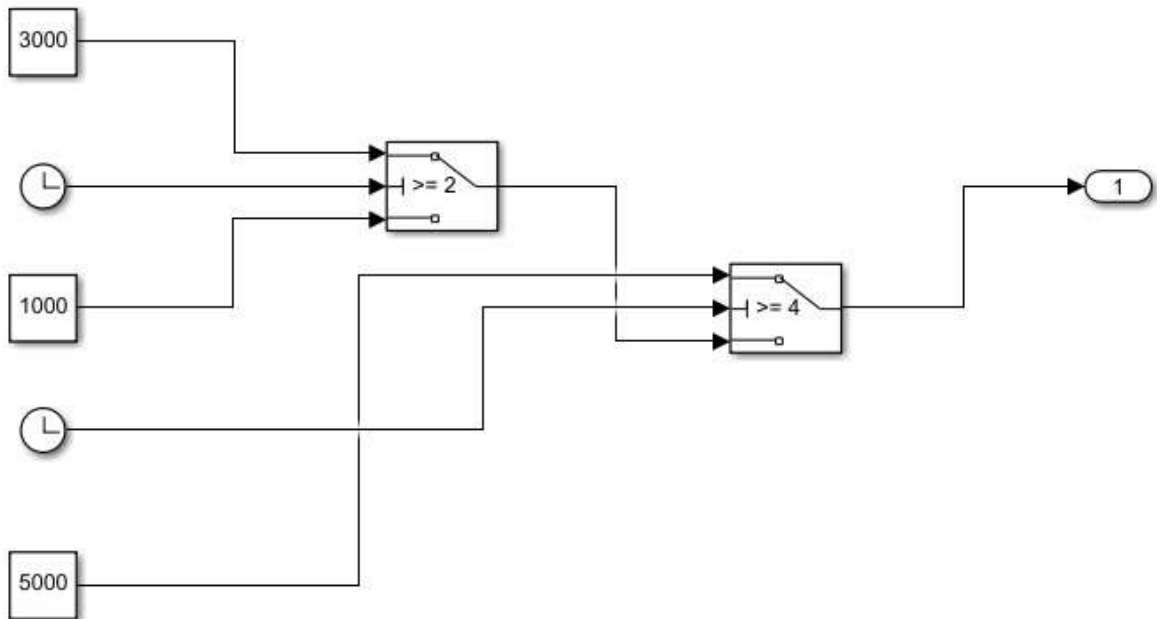
Şekil 10. Girişteki 5kW'lık basamak fonksiyonunun çıkıştaki değişim grafiği

Ziegler Nichols Metodu ile optimize edilmemiş, deneme yanılma yöntemi ile bulunan PID denetleyicinin parametreleri $K_p = 400$ $K_i = 350$ $K_d = 100$ olarak bulunmuştur. 5kW'lık basamak fonksiyonu için çıkış değişim grafiği Şekil 11'de verilmiştir.

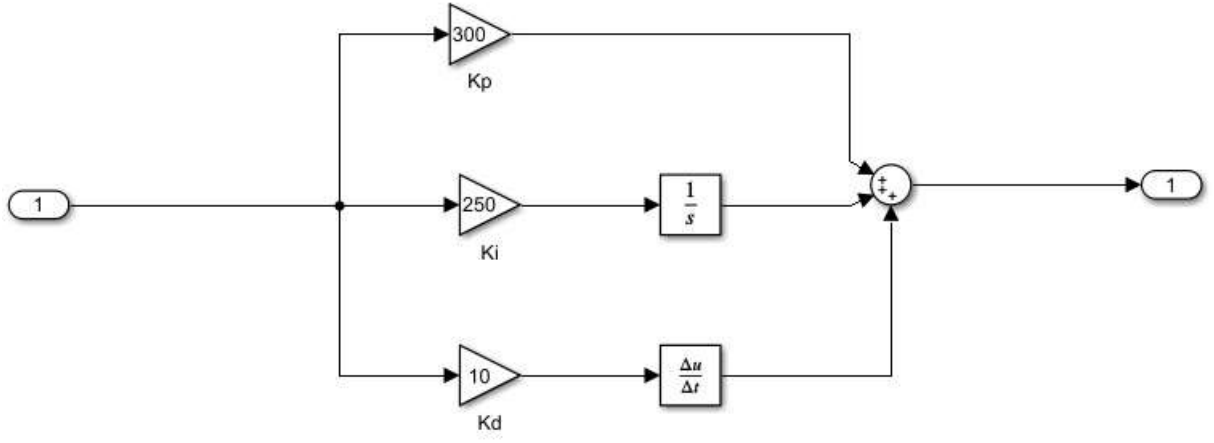


Şekil 11. Girişteki 5kW'lık basamak fonksiyonuna ve $K_p= 400$ $K_i= 350$ $K_d=100$ değerlerine karşılık sistemin çıkış cevabı

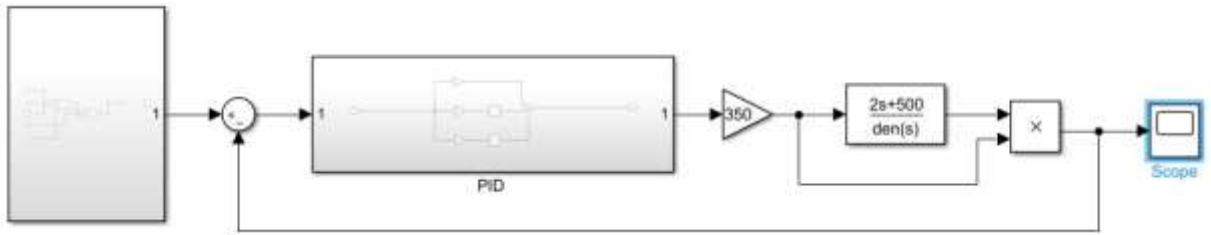
Tasarlanan kontrolcünün uygulandığı ohmik ısıtma sistemindeki dinamik performansını değerlendirmek amacıyla referans değerler anlık olarak değiştirilmiş ve sistemin tepkisi incelenmiştir. 0 ile 2 saniye aralığında referans değer olarak 1000W seçilmiş olup, 2. ve 4. saniyeler arasında bu referans değer 3000W değerine yükseltilmiştir. Bununla birlikte 4. ve 6. saniyeler arasında göz önüne alınan referans değeri 5000W değerine çıkarılmıştır. Bu referans değerlerindeki değişim ile kontrolcünün sistem çıkışını aynı değerlerde takip ettirmesi beklenmiştir.



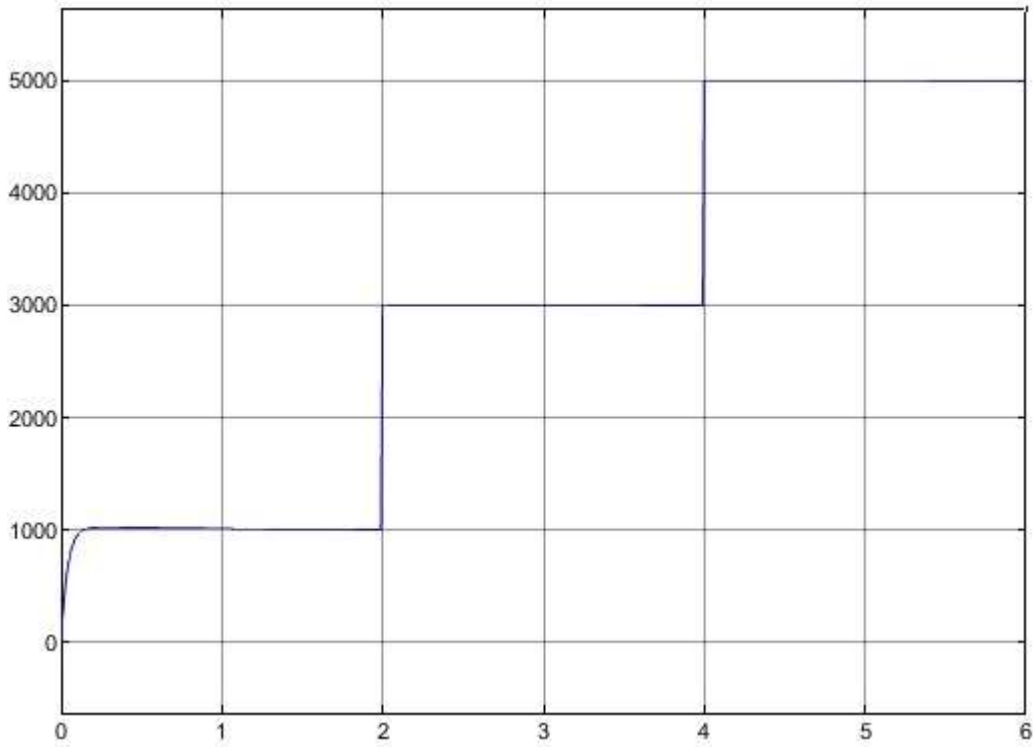
Şekil 12. Zamanla referans değerinin değiştirilmesi için kullanılan simulink modeli



Şekil 13. Sistemde kullanılan PID denetleyici



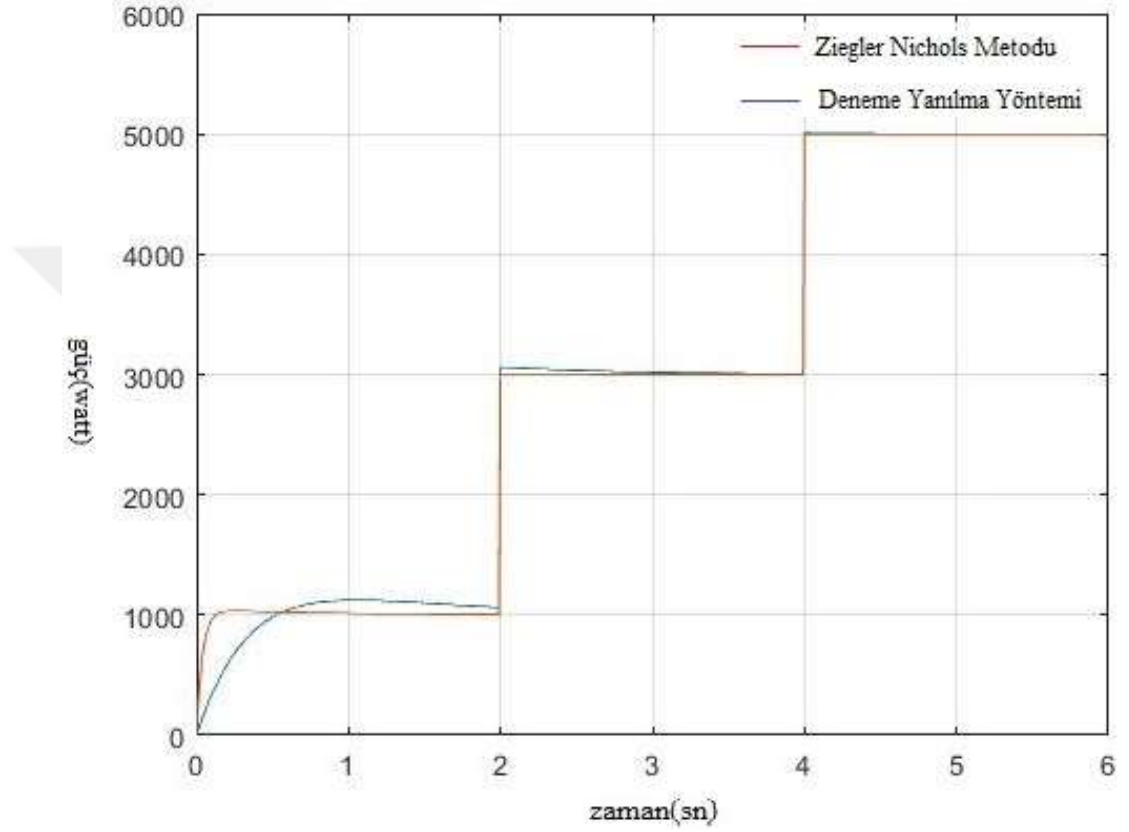
Şekil 14. Referans değişikliğine karşılık dinamik sistem davranışının gözlemlendiği sistem



Şekil 15. Zamanla değiştirilen referans değerlere karşılık sistemin tepkisi

Tasarlanan ve optimize edilen PID denetleyici ile sistem çıkışının tanımlanan yeni referans değerlerini oldukça iyi bir doğrulukla takip ettiği Şekil 15'te verildiği gibi gözlemlenmiştir. 2. ve 4. saniyedeki referans değişikliklerini sistemin 0.02 saniyelik yükselme

süresi ile takip ettiği belirlenmiştir. Başlangıçtaki %2,5'lük aşımın haricinde sistemde herhangi bir aşım gözlemlenmemiştir. Buna karşılık en büyük yükselme zamanı başlangıç için gözlenmiş olup, değeri 0,13 saniye olarak belirlenmiştir. Bunların haricinde referans değerindeki değişiklikler için herhangi bir aşım değeri gözlemlenmemiş olup yükselme süresi de 0,02 saniyeden daha fazla olmadığı belirlenmiştir. Şekil 16'da Ziegler Nichols metodu ile optimize edilmiş değerlere göre sistemin tepkisi ve deneme yanılma yöntemi ile bulunan değerlere göre sistemin tepkisi birlikte verilmiştir.



Şekil 16. Ziegler Nichols metodu ve deneme yanılma yöntemi

SONUÇLAR

Ohmik ısıtma, avantajlarının fazla olması sebebiyle en çok tercih edilen ısıtma yöntemlerinden biridir. Ohmik ısıtmanın en belirgin avantajı; gıda kalitesini artırması, maliyeti azaltması ve enerji tasarrufu sağlamasıdır. Ohmik ısıtma, güvenli, yüksek kaliteli gıda üretebilir. Ohmik olarak işlenmiş gıdalarda bakteriler, virüsler, mantarlar ve parazitler veya zararlı sporelerden arınmış olma durumu söz konusudur. Ohmik ısıtma; sistemdeki ısı üretim hızı, gıdanın elektriksel iletkenliği, elektrik alan şiddeti, kalış süresi ve gıdanın sistemden geçme yöntemi gibi özelliklerle başarı sağlamıştır. Bu sebeplerden dolayı literatürde çokça tasarlanmış ve uygulama alanı bulmuştur. Ohmik ısıtma sistemi bu çalışmada göz önüne alınmış ve Ziegler Nicols Metodu ile parametreleri optimize edilmiş bir PID denetleyicisi tasarlanmıştır. Ziegler Nichols Metodu ile optimize edilmiş ve $K_p = 300$ $K_i = 350$ $K_d = 10$ olarak parametreler bulunmuştur. Bulunan bu değerlere karşılık girişteki 5kW'lık basamak fonksiyonu için çıkışın değişim grafiği verilmiştir. Aynı zamanda Ziegler Nichols Metodu ile optimize edilmemiş, deneme yanılma yöntemiyle bulunan $K_p = 400$ $K_i = 350$ $K_d = 100$ parametre değerlerine karşılık girişteki 5kW'lık basamak fonksiyonu için çıkışın değişim grafiği gözlemlenmiştir. Optimize edilmiş ve uygulanmış bu kontrolcü ohmik ısıtma sistemine uygulandığında referans değerleri anlık olarak değiştirilerek sistemin dinamik performansı incelenmiştir. Sistemin anlık olarak değişen referans değerlerine göre göstermiş olduğu tepkilerde en fazla %2,5'lük aşım gerçekleşmiş, 0,13 saniye sürede de en büyük yükselme zamanını göstermiştir. Bunların haricinde sistem çalışmaya başlayıp referans değerine oturup kararlı hale geldikten sonraki karşılaşılan en büyük yükselme zamanı 0,02 saniye olarak gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Bansal, B. and Chen, X., "Effect of temperature and power frequency on milk fouling in an ohmic heater," *Food Bioproducts Process.*, vol. 84, no. 4, pp. 286–291, 2006.
- Baysal, T., İçier, F., Baysal, H.A. (2011). *Güncel Elektriksel Isıtma Yöntemleri*. Sidas Medya Yayınları, Çankaya, İzmir
- Baysal, T., İçier, F., Baysal, A.H., 2011, *Güncel Elektriksel Isıtma Yöntemleri*, s.28
- Bengtson, R., Birdsall, E., Feilden, S., Bhattiprolu, S., Bhale, S., and Lima, M., "Ohmic and inductive heating," in *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering*, vol. 3, Y.Hui, Ed. New York, NY, USA: Taylor&Francis, 2006, ch. 120.,
- Bertolini, M., and Romagnoli, G., "An Italian case study for the process target- cost evaluation of the ohmic treatment and aseptic packaging of a vegetable soup (minestrone)," *J. Food Eng.*, vol. 110, no. 2, pp. 214–219, 2012.
- Biss CH, Coombes SA and Skudder PJ 1989. The development and application of ohmic heating for the continuous heating of particulate foodstuffs, in Field, R.W., Howell, J.A. (Eds), *Process Engineering in the Food Industry, Developments and Opportunities*, Elsevier, New York, 17-25.
- Bowtell L., and Ahfock, A., "Direct current offset controller for transformerless single-phase photovoltaic grid-connected inverters," *IET Renewable Power Gener.*, vol. 4, no. 5, pp. 428–437, Sep. 2010.
- Brunton NP, Lyng JG, Li W, Cronin DA, Morgan D, McKenna B (2005) Effect of radio frequency (RF) heating on the texture, colour and sensory properties of a comminuted pork meat product. *Food Res Int* 38(3):337–344et
- Carpita, M., "Circuit device for preventing saturation of the transformer in a dc/ac converter having a feedback regulated inverter," U.S. Patent 5 355 299, Oct. 11, 1994.
- Chandarana, D. I., Unverferth, J. A., (1996). Residence time distribution of particulate foods at aseptic processing temperatures. *J Food Eng* 28:349–360
- Chandra, A., and Bagchi, B., "Frequency dependence of ionic conductivity of electrolyte solutions," *J. Chem. Phys.*, vol. 112, no. 4, pp. 1876–1886, 2000.
- De Alwis AAP, Fryer PJ. The use of direct resistance heating in the food industry. *J Food Eng* 1990, 11:3–27.
- De Halleux G, Pielt M, Buteau ML, Dostie A (2005) Ohmic cooking of processed meats: energy evaluation and food safety considerations. *Can Biosyst Eng* 47:3.41–3.47
- Di Geronimo, M., Garthright, L. J. (1997) Statistical design and analysis. *Food Tech* 51(10):52–54
- Engineering ToolBox, "Specific heat of food and foodstuff," 2003.[Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heatcapacity-food-d_295.html, (15.03.2021)
- Enjeti P. N. and Shireen, W., "A new technique to reject DC-link voltage ripple for inverters operating on programmed PWM waveforms," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 7, no. 1, pp. 171–180, Jan. 1992.

- Fadl Mohamed and Shuli Liu. A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH) Article in *Renewable and Sustainable Energy Reviews* · s.262-269, November 2014
- Fryer PJ, deAlwis AAP, Koury E, Stapley AGF, Zhang L (1993) Ohmic processing of solid–liquid mixtures: heat generation and convection effects. *J Food Eng* 18:101–125.
- Ghnimi, S., Flach-Malaspina, N., Dresch, M., Delaplace, G., and Maingonnat, J., “Design and performance evaluation of an Ohmic heating unit for thermal processing of highly viscous liquids,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 86, no. 6, pp. 626–632, 2008.
- Halden, K., de Alwis, AAP, Fryer PJ (1990) Changes in electrical conductivity of foods during ohmic heating. *Int J Food Sci Tech* 25:9–25
- Icier, F. and Ilicali, C., “Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating,” *Food Res. Int.*, vol. 38, no. 10, pp. 1135–1142, 2005.
- Icier, F., “Ohmic heating of fluid foods,” in *Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods*, P. Cullen, B. K. Tiwari, and V. P. Valdramidis, Eds. San Diego, CA, USA: Academic, 2012, ch. 11, pp. 305–367
- IEA. International Energy Agency, Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions: in support of the G8 plan of action. Paris, France; 2007
- Imai T., Uemura K., Ishida N., Yoshizaki S., Noguchi A., (1995) Ohmic heating of Japanese white radish *Raphanus sativus* L. *Int J Food Sci Technol* 30:461–472
- İcier, F. 2003. Gıdaların Ohmik Isıtılma Yöntemiyle Isıtılmasının Deneysel ve Kuramsal Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 245
- İcier, F. 2005. Gıda İşlemede Alternatif Isıtma Yöntemi-Ohmik Isıtma. *Gıda*, 30, 2, 139-143
- Jones, F., “Apparatus for electrically treating liquids,” U.S. Patent 592,735, Oct. 26, 1897.
- Katrokha, I., Matvienko Lukupchik, M., Zaets, V. 1984. Intensification of sugar extraction from sweet sugar beet cossettes in an electric field. *Sakharnaya Promyshlennost*, 7, 28–33
- Kaur, N. and Singh, A.K. 2016. Ohmic Heating: Concept and Applications-A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(14): 2338-2351.
- Kim HJ, Choi YM, Yang TCS, Taub IA, Tempest P, Skudder P, Tucker G, and Parrott DL. 1996. Validation of Ohmic heating for quality enhancement of food products, *Food Technology*, May: 253-255, 257-261.
- Knirsch, M. C., Santos C. A., Martins A. A., Vincente, O. A., Penne, T. C. V., (2010) Ohmic heating—a review. *Trends Food Sci Tech* 21:436–441
- Kulshrestha S. A., and Sastry, S. K., "Low-frequency dielectric changes in cellular food material from ohmic heating: Effect of end point temperature," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 7, pp. 257-262, 2006
- Kulshrestha, S. A., and Sastry, S. K., "Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 4, pp. 189-194, 2003
- Larkin JW and Spinak SH. 1996. Safety considerations for ohmically heated, aseptically processed, multiphase low-acid food products, *Food Technol.*, 50, 5, 242-245
- Lima M, Sastry SK. The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. *J Food Eng* 1999;41:115–9.
- Lima, M., Heskitt, B. F., and Sastry, S.K., “The effect of frequency and wave form on the electrical conductivity-temperature profiles of turnip tissue,” *J. Food Process. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 41–54, Apr. 1999

- Mannen, T., and Fujita, H., "A DC capacitor voltage control method for active power filters using modified reference including the theoretically derived voltage ripple," in *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 5, pp. 4179–4187, Sep./Oct. 2016.
- Marcotte, M., Trigui, M., Ramaswamy, H.S., 2000a. Effect of salt and citric acid on electrical conductivities and ohmic heating of viscous liquids. *J. Food Processing and Preservation*, 24, 389-406
- Mcconnel SV, Olsson Rp, Wiener vending machine. US patent, 2,139,690, 1938.
- Mohamed Ali, E., "Design and Simulation of 10 kHz voltage source three phase resonant DC link inverter for 10 kW ohmic heating process," *MSc. Thesis, Universiti Putra Malaysia*, pp. 63, 2001.
- Morren, J., Roodenburg, B., and de Haan, S.W., "Electrochemical reactions and electrode corrosion in pulsed electric field (PEF) treatment chambers," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 285–295, 2003.
- Parrott DL (1992) Use of ohmic heating for aseptic processing of food particulates. *Food Tech* 46(245):239–241.
- Perl, K. *et al.*, "Annual energy outlook 2018," U.S. Energy Inf. Admin., Washington, DC, USA, Tech. Rep. AEO2018, 2018.
- Qihua, T., Jindal, V.K., Van Winden, J. (1993). Design and performance evaluation of an ohmic heating unit for liquid foods. *Computers and Electronics in Agriculture*, 9, 3, 243-253.
- Ramaswamy, H.S., Abdelrahim, K.A., Simpson, B.K., Smith, J. P. (1995) Residence time distribution (RTD) in aseptic processing of particulate foods: a review. *Food Res Int* 28(3):291–310
- Ramos, M. F. D. and Tacca, H. E., "Ohmic heating of food by means of high frequency power inverters," in *Proc. 15th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, Sep. 2013, pp. 1–10.
- Rentokil, "Food processing: Global trends," 2014. [Online] Available: <https://www.rentokil.com/sector-insights/food-processing/global-trends/>
- Reznick, D. 1996. Ohmic heating of fluid foods. *Food technology*, May, 250-251
- Reznick, D. 2000. Electroheating, <http://www.raztek.com/electroheating.html> (16.04.2021)
- Roberts, J.S., Balaban, M.O., Zimmermann, R., Luzuriaga, D. 1998. Designed and testing of a prototype ohmic thawing unit. *Comput. Electro. Agr.*, 19, 211-222
- Ruan, R., P. Chen, K. Chang, H.J. Kim and I.A. Taub. 1999. Rapid food particle temperature mapping during ohmic heating using flash magnetic resonance imaging. *Journal of Food Science* 64:1024-1026.
- Sack, M., Ruf, J., Hochberg, M., Herzog, D., and Mueller, G., "A device for combined thermal and pulsed electric field treatment of food," in *Proc. Int. Conf. Optim. Elect. Electron. Equip., Int. Aegean Conf. Elect. Mach. Power Electron.*, May 2017, pp. 31–36.
- Samaranayake, C. P., Sastry, S. K., (2005) Electrode and pH effects on electrochemical reactions during ohmic heating. *J Electroanal Chem* 577:125–135
- Samaranayake, C. P., Sastry, S. K., and Zhang, H., "Pulsed ohmic heating: A novel technique for minimization of electrochemical reactions during processing," *J. Food Sci.*, vol. 70, no. 8, pp. e460–e465, 2006.
- Samaranayake, C. P., Sastry, S. K., and Zhang, H., "Pulsed ohmic heating: A novel technique for minimization of electrochemical reactions during processing," *J. Food Sci.*, vol. 70, no. 8, pp. e460–e465, 2006.

- Sarang, S., Sastry, S. K., and Knipe, L., "Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating," *J. Food Eng.*, vol. 87, no. 3, pp. 351–356, 2008.
- Sastry SK and Li Q. 1996. Modeling the Ohmic heating of foods, *Food Technology*, May: 246-248
- Sastry SK and Salengke S. 1998. Ohmic heating of solid-liquid mixtures: a comparison of mathematical models under worst- case heating conditions. *Journal of Food Process Engineering*, 21: 441-458.
- Sastry SK, Palaniappan S. Ohmic heating of liquid–particle mixtures. *Food Technol* 1992, 46:64–7.
- Sastry, S. K., (1992) A model for heating of liquid-particle mixtures in a continuous flow ohmic heater. *J Food Process Eng* 15:263–278
- Sastry, S. K., (1997) Measuring residence time and modeling the system. *Food Tech* 51(10):44–48
- Sastry, S.K., Barach, J.T. 2000. Ohmic and inductive heating. *Journal of Food Science*
- Sastry, S.K., Cornelius, B. D. (2002). *Aseptic processing of foods containing solid particulates*. John Wiley and Sons, Inc, New York
- Schade A, Prevention of enzymatic discoloration of potatoes. US patent, 2,569,075, 1951.
- Segner, W.P., Ragusa, T. J., Marcus, C. L., Soutter, E. A., (1989) Biological evaluation of a heat transfer simulation for sterilizing low-acid large particulate foods for aseptic packaging. *J Food Process Preserve* 13:257–274
- Silva, V.L.M., Santos, L.M.N.B.F. and Silva, A.M.S. 2017. Ohmic Heating: An Emerging Concept in Organic Synthesis. *Chemistry European Journal*, 23: 7853-7865.
- Skudder J. 1989. Ohmic heating in food processing. *Asean Food Journal*. 4,4: 162-163
- Skudder PJ. Ohmic heating: new alternative for aseptic processing of viscous foods. *Food Eng* 1988;60:99–101
- Skudder, P. J., and Stirling, R., "The commercial development of ohmic heating processes," in *Advanced Food Technology*, IEE Colloquium on, May 1992, pp. 3/1-3/2.
- Soldati A. , *Member, IEEE*, Toscani A. , Cova P., and Franceschini G., 2019. Design and Control of High-Density High-Voltage Smart Converter for Food Ohmic Heating. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 55, No. 6, November/December 2019
- Speller, M.N., J.B. Litchfield and A. Webb. 1999. Temperature mapping during ohmic heating using proton resonance frequency magnetic resonance imaging. ASAE Paper No. NAR 99-6036, 25 p, Toronto, Canada, St-Joseph, MI. ASAE.
- Takhistov, P., (2007) Dimensionless analysis of the electric field based food processes for scale-up and validation. *J Food Eng* 78:746–754
- Tempest, P. 1995. Ohmic Heating Systems, in *APV Processed Food Sector Process Manual Section-9, Electrical Heating*, Issue 1, 54 p. Sal
- Tempest, P. 1996. Electroheat Technologies in Food Processing, *APV Marketing Bulletin* 16 p.
- Tian, X., Yu, Q., Wu, W. and Dai, R., 2018. Inactivation of Microorganisms in Foods by Ohmic Heating: A Review. *Journal of Food Protection* · 81.7, 1095-1105.
- Toudeshki, A., Mariun, N., Hizam, H., Bashi, S. M. and Jamaludin, H., "Variable high frequency voltage source for an ohmic heating process," in *Proc. IEEE 2nd Int. Power Energy Conf.*, Dec. 2008, pp. 594–598

- Varghese, K. S., Pandey, M. C., Radhakrishna, K., and Bawa, A. S., "Technology, applications and modelling of ohmic heating: A review," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 51, no. 10, pp. 23-042317, Oct. 2014.
- Weber H. *et al.*, "Annual report 2018," FoodDrink Europe, Bruxelles, Belgium, Tech. Rep., 2018..
- Wenyan, D., and Lu, J., "Design on ohmic heating sterilization device for food based on AVR microcontroller," in *Proc. 4th Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Autom.*, vol. 2, Mar. 2011, pp. 51–53.
- World population prospects 2017—Data booklet, Dept. Econ. Soc. Affairs, United Nations Population Div., New York, NY, USA, Tech. Rep. ST/ESA/SER.A/401, 2017
- Wu, H., Kolbe, E., Flugstad, B., Park, J. W. and Yongsawatdigul, J., "Electrical Properties of Fish Mince During Multi-frequency Ohmic Heating," *Journal of Food Science*, vol. 63, pp. 1028-1032, 1998.
- Zell, M., Lyng, J., Cronin, D.A., Morgan, D.J. 2010 Ohmic cooking of whole turkey meat – Effect of rapid ohmic heating on selected product parameters. *Food Chemistry* 120(3):724-729
- Zhao Y, Kolbe E, Flugstad B (1999) A method to characterise electrode corrosion during ohmic heating. *Journal Food Process Engineering* 22, 81–89.
- Zoltai P. and Swearingen P. 1996. Product development considerations for ohmic processing, *Journal of Food Technology*, 50, 5, 263-266.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Buket DİNÇ
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Merkez Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Almanca:	
Rusça:	
Diğer	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	