

## Süt İşlemede Ultrason Kullanımı\*

Cesur Mehenktaş  

Ege Üniversitesi, Tire Kutsan Meslek Yüksekokulu, Gıda Teknolojisi Programı, Tire, İzmir

Geliş Tarihi (Received): 21.11.2022, Kabul Tarihi (Accepted): 20.12.2022

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): cesur.mehenktaş@ege.edu.tr (C. Mehenktaş)

☎ 0 232 512 8616 📠 0 232 512 8616

\*: Bu makale 13.08.2012 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiş ancak yayınlanması gecikmiş çalışmanın yazar tarafından güncellenmiş nüshasının hakem değerlendirme süreci doğrultusunda kabul edilmiş son halidir.

### ÖZ

Ultrasonik işleme, gıda sanayisindeki yeni teknolojilerden biridir. Ultrason terimi işitilebilir frekans aralığının ötesindeki ses dalgalarını ifade etmektedir. Ultrason sıvı bir ortamdan geçtiğinde, akustik kavitasyon olarak bilinen bir olay meydana gelmektedir. Akustik kavitasyon, yüksek düzeyde reaktif radikaller, mikrojetler, kayma kuvvetleri, şok dalgaları ve türbülans gibi şiddetli fiziksel kuvvetler oluşturmaktadır. Ultrasonun bu etkileri süt işlemede membran temizleme, emülsiyon oluşumu, homojenizasyon, süt yağının ayrılması, süt yağının ve laktozun kristalizasyonu, gaz giderme, mikrobiyal ve enzimatik aktivasyon/inaktivasyon, ultrasonik görüntüleme, proses kontrolü, ultrasonik atomizasyon ve fonksiyonel özelliklerin değiştirilmesi gibi işlemlerde kullanılmaktadır. Bu derleme çalışmasında, ultrason ve akustik kavitasyon kavramlarının yanı sıra ultrason teknolojisinin süt ve süt ürünlerinde kullanımı ile ilgili bilgiler sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Ultrason, Akustik kavitasyon, Süt işleme

### Use of Ultrasound in Dairy Processing

#### ABSTRACT

Ultrasonic processing is one of the novel technologies in food industry. The term ultrasound refers to sound waves beyond the audible frequency range. When ultrasound passes through a liquid medium, a phenomenon known as acoustic cavitation occurs. Acoustic cavitation generates highly reactive radicals and intense physical forces such as microjets, shear forces, shock waves and turbulence. These effects of ultrasound are used in dairy processing for membrane cleaning, emulsion formation, homogenization, separation of milkfat, crystallization of milkfat and lactose, degassing, microbial and enzymatic activation/inactivation, ultrasonic imaging, process control, ultrasonic atomization, and alteration of functional properties. In this review, information about the concepts of ultrasound and acoustic cavitation along with the use of ultrasound technology in milk and dairy products is presented.

**Keywords:** Ultrasound, Acoustic cavitation, Dairy processing

#### GİRİŞ

Tüketicilerin duyu ve beslenmeyle ilgili konular, kolaylık, yapay katkı maddelerinin bulunmaması, düşük enerji gereksinimi ve çevre güvenliği ile ilgili taleplerini karşılamak amacıyla çeşitli muhafaza teknikleri geliştirilmektedir [1]. Ayrıca, daha taze, daha doğal ve

daha sağlıklı ve aynı zamanda güvenlik düzeyi yüksek gıdalara olan tüketici talepleri, gıdalardaki mikroorganizmaları inhibe etmek ve enzimleri inaktif hale getirmek için ısı olmayan muhafaza tekniklerine karşı ilgiyi arttırmıştır [2]. Bunlar arasında ultrason, minimum düzeyde işlenmiş gıdalara olan tüketici ilgisi nedeniyle gıda işlemede önemli bir role sahiptir.

Ultrason; süre, enerji tüketimi vb. gıda işleme parametrelerini minimize etmek, gıda kalitesi ve güvenliğini iyileştirmek için uygulanmaktadır [3].

Ultrason halihazırda ticari süt işleme uygulamalarına önemli ölçüde girmiştir. Bu konuda muhtemelen en önemli uygulama ultrasonik peynir kesim aletlerinin kullanımıdır. Bu makineler neredeyse sürtünmesiz bir yüzey sağlayan, yüksek frekansta titreşim yapan bir bıçak kullanmakta ve bu sayede peynirin deforme olmadan, bıçağa yapışmadan, pürüzsüz bir şekilde kesilmesini sağlamaktadır [4]. Ultrason ile gıdaların kesilmesinin, işlenmesi zor gıdalarda bile hız ve verimliliği sağladığı bildirilmektedir [5]. Ultrason ayrıca süt kutularını ve rendelenmiş peynir ambalajlarını kapatmada ticari olarak kullanılmaktadır ki ultrasonik kaynaklama da denilen bu işlemde, kavitasyon işleminden kaynaklanan sıcaklık plastiği kaynaklamak için yeterli olmaktadır [6]. Ultrasonun süt işlemede söz konusu uygulamaların yanı sıra farklı kullanımları da bulunmaktadır ve bu makalede bu kullanımlara ilişkin bilgiler verilmektedir.

## ULTRASON VE AKUSTİK KAVİTASYON

Ultrason 20 kHz'in üzerindeki frekanslarda çalışan titreşimsel bir enerji türüdür [7]. Ultrason teknolojisi insan işitme aralığının üzerinde, 20 kHz'den 10 MHz'e kadar ses dalgaları kullanmaktadır ve genellikle uygulamaları düşük şiddetli (100 kHz-10 MHz, <1 W/cm<sup>2</sup>) ve yüksek şiddetli (20-100 kHz, >1 W/cm<sup>2</sup>) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [8]. Ultrason sıvı bir ortamdan geçtiğinde ultrasonik dalgalar, sıvı ve çözülmüş gaz arasındaki etkileşim "akustik kavitasyon" olarak bilinen bir olaya yol açmaktadır. Kısaca bahsetmek gerekirse, çözülmüş gaz çekirdekleri çevrelerindeki dalgalanan basınç nedeniyle akustik alanın etkisi altında titreşmektedir. Titreşimler sırasında, çözülmüş gaz ve çözgen buharı titreşen baloncukların içine ve dışına difüze olmaktadır. "Düzeltilmiş difüzyon" işlemi nedeniyle, genleşme fazı sırasında baloncukların içine difüze olan gaz/buhar miktarı, baloncuk titreşiminin sıkışma fazı sırasında baloncukların dışına difüze olan miktardan fazladır. Bu durum, baloncukların rezonans boyut aralığına doğru büyümesine yol açmaktadır. Baloncuklar rezonans boyut aralığına ulaştıklarında, bir akustik döngü içerisinde maksimum boyuta büyümekte ve şiddetle söner, sönen baloncuklar içerisinde çok yüksek sıcaklık koşulları meydana gelmektedir. Deneysel olarak belirlenen sıcaklıklar yaklaşık 1726.85-9726.85°C olup, teorik olarak yapılan tahminler 99726.85°C'ye kadardır. Kavitasyon baloncukları içerisinde yüksek düzeyde reaktif radikaller meydana gelmektedir [9]. Akustik kavitasyonun başlıca mekanik etkileri şok dalgalarına bağlı hasar ve mikrojet etkileridir [10]. Ultrason uygulaması ile gerçekleşen diğer mekanik olaylar ajitasyon, türbülans, titreşim, basınç, kayma kuvvetleri ve akustik akıştır [11].

Ultrason frekansı baloncuk boyutuyla ters orantılıdır. Dolayısıyla, düşük frekanslı ultrason büyük kavitasyon baloncukları oluşturarak kavitasyon bölgesinde daha yüksek sıcaklıklara ve basınçlara neden olmaktadır. Frekans yükseldikçe kavitasyon bölgesinin şiddeti

azalmakta ve megahertz düzeylerinde artık hiç kavitasyon görülmemektedir ve ana mekanizma akustik akıştır. Çoğu sanayi uygulaması 16 ile 100 kHz arasında gerçekleştirilmektedir, çünkü kavitasyon bu frekans aralığında oluşmaktadır [12].

Ultrasonun sanayi proseslerinde kullanımında başlıca iki gereksinim söz konusudur ki bunlar bir sıvı ortam (sıvı kısım, toplam ortamın sadece %5'ini oluştursa dahi) ve bir yüksek enerjili titreşim kaynağı (ultrason)'dır. Titreşim enerjisi kaynağına dönüştürücü adı verilmekte ve titreşimi kuvvetlendirdikten sonra işleme ortamıyla doğrudan temas halinde bulunan proba iletmektedir [12].

## ULTRASONUN SÜT ve ÜRÜNLERİNDE KULLANIMI

Ultrason, ürünlerde minimum değişimlere yol açması ve daha düşük enerji gereksinimi ile gıda işleme ve muhafazasındaki gelecek vadeden etkileri nedeniyle süt sanayisi için gelişmekte olan yenilikçi bir teknoloji olarak kabul edilmektedir [13]. Özellikle yüksek şiddetli ultrasonun gıdalarda ve diğer ürünlerde kaliteye zarar vermeksizin prosesleri kontrol etme, iyileştirme ve hızlandırmada büyük bir potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir [14]. Proses etkinliğinin artması, uygun fonksiyonelliğe sahip ürünler üretme olanağı, gıdayı muhafaza etme ve enzim aktivitesini değiştirme imkanı ve bileşen etkileşimleri yoluyla mikroyapıyı iyileştirme olanağı nedenleriyle süt sanayisindeki çeşitli uygulamalar için ultrason kullanımı gittikçe geliştirilmektedir [9].

## Membran Temizleme

Membran teknolojileri; süt ve gıda teknolojisi, ilaç sanayisi, kimya sanayisi ve atık su arıtma gibi birçok endüstriyel uygulamada yaygın şekilde kullanılmaktadır [15]. Ultrafiltrasyon membranlarının tıkanması birçok süt üretim işleminin maliyet ve verimini etkileyen önemli bir konudur. Süt ve bileşenlerinin filtrasyonu sırasında filtrasyon membranlarında membran tıkanmasına ve sonuç olarak büyük ölçekli işlemlerde verim azalmasına yol açan partikül birikimi meydana gelmektedir [6].

Süt sanayisinde peyniraltı suyunun ultrafiltrasyonunda kullanılan membranlar, membranın ömrünü uzatmak, hijyenik işlemi sağlamak, membran performansını sürdürmek ve membran yenileme maliyetini azaltmak için her partiden sonra temizlenmekte ve dezenfekte edilmektedir. Dolayısıyla membran temizleme, ayırma işleminde kullanılan membranların muhafazasında önemli bir aşamadır. Sanayide halen membran temizleme için kullanılan farklı fiziksel ve kimyasal temizleme yöntemleri bulunmaktadır. Kimyasal işlemler, yüzey aktif maddeler ve kostik soda gibi membran materyaline zarar verebilen ve membranın ömrünü kısaltabilen büyük miktarlarda pahalı kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Geri yıkama gibi fiziksel temizleme yöntemleri de tıkalı membranları temizlemek için kullanılmaktadır. Ancak bu teknikler sürekli filtrasyon işlemini aksatarak daha uzun işlem süresine neden olmaktadır [16]. Membran temizlemede ultrason

uygulaması kullanımının gelecek vadede bir teknik olduğu belirtilmektedir [17]. Ultrason uygulaması, kimyasal maddelere bel bağlamayı ve fiziksel temizleme yöntemlerinde karşılaşılan sorunları azaltmak için süt sanayisinde membranların temizlenmesinde olası bir yöntem olarak önerilmektedir. Ultrason ince partiküllerin bir araya toplanmasına yol açmakta ve bu partikülleri kısmen asılı tutmak için sisteme yeterli karıştırma enerjisi sağlamaktadır. Bu durum solvent geçişi için daha fazla serbest kanal temin etmektedir. Ultrasonik dalganın yol açtığı kaviteasyon olayı membran yapısı üzerindeki kekin yer değiştirmesine de yardımcı olabilmekte, bu durum tıkanmanın önlenmesini desteklemekte ve daha iyi ayırma hızlarına olanak tanımaktadır [16]. Ultrafiltrasyon membranlarının temizlenmesinde ultrason kullanımının düşük frekanslarda (20-25 kHz) daha etkili olduğu bildirilmektedir [18].

Ultrason teknolojisi mikrofiltrasyon membranlarının temizlenmesinde de kullanılabilir. Maskooki ve ark. [19] tarafından yapılan bir çalışmada, çeşitli frekanslarda (28, 45 ve 100 kHz) ve karışık dalga tipinde (30 dakikalık toplam sürede her 1 dakikada sırasıyla 28, 45 ve 100 kHz olacak şekilde) ultrason, %1'lik yağsız süttozu çözeltisi ile tıkanmış mikrofiltrasyon membranlarının ileri yıkama ile temizlenmesinde, tek başına ve şelat oluşturuca madde olarak iki farklı konsantrasyonda (1 ve 3 mmol) EDTA ile birlikte kullanılmıştır. Çalışmada karışık dalga tipindeki ultrasonun tek başına ve 1 mmol konsantrasyonundaki EDTA ile birlikte kullanımının diğer uygulamalara kıyasla daha yüksek temizleme etkinliğine sahip olduğu ve ultrasonun EDTA ile birlikte kullanılması durumunda sinerjik etki oluştuğu saptanmıştır. Ayrıca, etkili ultrason frekansı ve düşük konsantrasyonda EDTA ile birlikte yalnızca 5 dakikalık ileri yıkamanın, tıkanmış mikrofiltrasyon membranlarının temizlenmesinde yeterli olduğu belirlenmiştir.

### **Emülsiyon Oluşumu, Homojenizasyon ve Süt Yağının Ayrılması**

Emülsiyon oluşumu, biri diğeri içerisinde küçük damlacıklar halinde disperse edilen karışmayan iki sıvıdan (genellikle yağ ve su) oluşan bir sistemin meydana getirildiği işlemdir. Emülsiyonlar, disperse edilen fazın damlacık boyutuna bağlı olarak mikro- (10-100 nm), nano- (100-1000 nm) ve makro-emülsiyonlar (0.5-100 µm) olarak sınıflandırılabilir [20].

Yüksek frekanslarda meydana gelen kayma kuvvetleri nispeten zayıftır ve bu nedenle emülsiyon oluşturma uygulamaları için kullanışlı değildir. Yalnızca düşük frekanslı ultrason (16-100 kHz) emülsiyon oluşturabilmektedir. Geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen emülsiyon uygulamalarıyla kıyaslandığında; ultrason ile emülsiyon oluşturmak için gereksinim duyulan enerji, geleneksel yöntemlerde gereksinim duyulandan daha düşüktür; ultrason ile oluşturulan emülsiyonlar daha kararlıdır; eğer varsa minimum düzeyde yüzey aktif maddeye gereksinim göstermektedir; mikrondan daha küçük bir boyuta ve son derece homojen bir boyut dağılımına sahiptir [9].

Ultrasonik yaklaşımın dikkate değer bir avantajı ekipman temizliğinin geleneksel homojenizatörlere veya daha yeni mikroakışkan cihazlara göre kolay olmasıdır. Bu durum aseptik bir ortamın sürdürülmesine yardımcı olmaktadır [6]. Ultrason uygulamasının diğer bir avantajı klasik homojenizatörlere göre daha düşük yatırım maliyeti gerektirmesidir [21].

Ultrasonik emülsiyon oluşumu sütün homojenizasyonunda bir hayli ilgi çekmektedir. Süt işleme sanayisinde ultrasonik homojenizasyon depolama sırasında kaymak bağlamaya karşı stabiliteyi arttırdığından süt, yoğurt ve dondurmanın işlenmesinde ana aşama olarak kullanılmaktadır [9]. Ultrason işleminin süt yağı globül çaplarını küçültmede, hem tek aşamalı hem de iki aşamalı geleneksel homojenizasyon işlemine göre daha etkili olduğu, globül çaplarındaki küçülmenin ultrason şiddetinin artmasıyla artış gösterdiği belirtilmektedir [21]. Ultrason kullanılarak homojenize edilmiş sütte üretilen probiyotik yoğurtlarda, geleneksel yöntemle homojenize edilmiş sütte üretilenlere göre su tutma kapasitesinin arttığı, ultrason uygulamasının yoğurtların duysal özelliklerini olumsuz yönde etkilemediği, aksine toplam kabul edilebilirlik ve tekstürü iyileştirdiği bildirilmiştir [22].

Diğer taraftan, 400 kHz'in üzerindeki yüksek frekanslara sahip ultrason süt yağının ayrılması için kullanılmaktadır. Yüksek frekanslı ultrason kullanımının; çok düşük ultrasonik frekanslarda meydana gelen yüksek düzeyde parçalayıcı/karıştırıcı kuvvetler yerine, yağı yer değiştirmeye teşvik eden daha hassas bir işlem olduğu düşünülmektedir. Yağ globülleri doğal olarak yüksek basınçlı bölgelere göç etmekte ve bu bölgelerde konsantrasyon hale gelerek topaklanmakta ve birleşmekte, bu da daha iyi bir kremalaşma oranına yol açmaktadır [23].

### **Süt Yağının ve Laktozun Kristalizasyonu**

Ultrason uygulamasının süt yağının kristalizasyonu üzerine olumlu etkileri bulunmaktadır. Bu etkilerden bir tanesi kristalizasyon işleminin hızlandırılmasıdır ki işleme süresini kısaltacağı için bu durum gıda sanayisi açısından çok önemlidir. Diğer bir etki de kristal boyutunun küçülmesidir. Gregersen ve ark. [24] susuz süt yağı ve süt yağı/kolza yağı karışımlarına yüksek şiddetli ultrason uyguladıkları çalışmalarında, ultrason uygulamasının kristalizasyon işlemini hızlandığını belirlemişlerdir. Çalışmada ayrıca ultrasonun kristal boyutunu da küçülttüğü ortaya konmuş ve bu durumun sürülebilir tereyağı karışımlarında yağın daha iyi bağlanmasını sağlayabileceği ifade edilmiştir. Benzer şekilde, Martini ve ark. [25] gerçekleştirdikleri bir araştırmada susuz süt yağına yüksek şiddetli ultrason uygulamışlar ve söz konusu uygulamanın kristalizasyon işlemini hızlandığını, daha küçük kristaller oluşturduğunu ve viskoziteyi arttırdığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar yüksek şiddetli ultrasonun yağların kristal ağ yapısını iyileştirmek amacıyla kullanılabilirliği sonucuna varmışlardır.

Diğer taraftan, ultrason uygulamasının sulu çözeltilerden laktozun kristalizasyonunu arttırdığı bilinmektedir [26].

Peyniraltı suyundan laktozun geleneksel yöntemle geri kazanım işlemi yavaştır ve laktoz kristallerinin kalitesini (kristallik, boyut dağılımı ve verim) kontrol etmek ya da öngörmek zordur. Safsızlıklar kristalizasyon işlemi değiştirebilmektedir ve bu nedenle genellikle peyniraltı suyu proteinleri peyniraltı suyundan uzaklaştırılmaktadır. Ancak her zaman küçük bir miktarda (>%1) peyniraltı suyu proteini kalmakta ve bu miktar konsantrasyon etme aşamasından sonra artış gösterebilmektedir. Sánchez-García ve ark. [27] tarafından yapılan bir çalışmada laktoz çözeltilerine ultrason uygulanmasının kristalizasyon işlemi hızlandırdığı, kristal boyutunu küçülttüğü ve kristal boyut dağılım aralığını daralttığı belirlenmiştir. Ayrıca, ultrason uygulanmamış örneklerde %0.64 oranındaki peyniraltı suyu proteinlerinin kristalizasyon işlemi hızlandırdığı ancak yapışkanlık ve topaklanma gibi sorunlara yol açan bir madde olan amorf laktoz oluşumuna yol açtığı saptanmıştır. 0.083 W/ml düzeyinde düşük şiddetli ultrason uygulamasının ise peyniraltı suyu proteinleri içeren laktoz çözeltisi örneklerinde amorf laktoz oluşumunu azalttığı ortaya konmuştur.

### Gaz Giderme

İşleme sırasında süt çözeltilerinin köpürmesi son ürün verimini azaltabilmekte ve oksidatif bozulmayı hızlandırabilmektedir [6]. Villamiel ve ark. [28] rekonstitüye yağsız sütün gazını gidermek için 20 kHz'lik atımlı ultrason kullanmışlardır. Çalışmada 5 dakikadan daha az ultrason uygulamasıyla gaz baloncukları kolayca uzaklaşırken, çözünmüş oksijen 20 dakikadan sonra bile önemli düzeyde azaltılamamıştır. Riera ve ark. [29] havadan nakledilen ultrasonun köpük minimizasyonu için etkili bir yaklaşım olabileceğini ortaya koymuşlardır.

### Mikrobiyal ve Enzimatik Etkiler

Ultrason, uygulamanın şiddetine ve frekansına bağlı olarak mikroorganizmalar üzerinde iki taraflı etki gösterebilmektedir: öldürücü etki ya da üremenin teşvik edilmesi [30]. Özellikle 20-40 kHz arasındaki yüksek şiddetli ultrason, zararlı fiziksel etkiler ve yüksek düzeyde oksitleyici hidroksil radikalleri meydana getiren kavitasyon baloncuklarının oluşumu nedeniyle biyolojik moleküllere zarar vermesine karşın, öldürücü düzeyin altında ultrason kullanımının birçok biyoproses için yararlı olduğu ortaya konmuştur [31].

Ultrason mikroorganizmalarda bakterisit etki elde etmek üzere saniyede en az 20000 titreşim kullanmakta ve hücre lizisi (parçalanması) vasıtasıyla enzim inaktivasyonuna neden olmaktadır [32]. Ultrasonik inaktivasyon etkisinden sorumlu ana mekanizma akustik kavitasyonun oluşturduğu fiziksel kuvvetlerdir. Bir kavitasyon baloncunun asimetrik olarak sönmesi, sönen baloncunun merkezinden hızla ilerleyen bir sıvı jetinin oluşumuna yol açmaktadır. Bu mikrojetin hızı saniyede birkaç yüz metredir. Bu yüksek hızlı jet nedeniyle katı yüzeylerde çukurlaşma gözlenmektedir. Mikroorganizmalar hidrofobik yüzeylere sahip olabilmekte, bu da kavitasyon baloncuklarının yüzeyde sönmelerini teşvik ederek hücre duvarına şiddetli zarara

yol açmaktadır. Benzer şekilde, mikroakış hücre duvarlarının aşınmasına neden olabilmekte, bu da mikroorganizmaların inaktivasyonuna yol açmaktadır. Kavitasyon etkilerine ilave olarak sıvı gıdalarda ultrasonun bakterisit etkisi, yapısal ve işlevsel bileşenleri hücrenin lizisi noktasına kadar tahrip eden "hücre içi kavitasyona" da dayandırılmaktadır. İnaktivasyonda lokal ısınma, DNA hasarına yol açan serbest radikal oluşumu ve hücre duvarlarının incelmeye neden olan mikroakışın etkileri çok önemlidir [9].

Farklı mikroorganizmaların ultrasona dirençleri büyük ölçüde değişim göstermektedir. Genel olarak, bakteri sporları (örneğin *Bacillus* ve *Clostridium* türleri) kavitasyon etkilerine gelişme evresindeki vejetatif hücrelerden daha dirençlidir. Mantarlar genel olarak vejetatif mikroorganizmalardan, aeroblar anaeroblardan ve genellikle koklar basillerden daha dirençlidir. Bazı çalışmalarda Gram pozitif bakterilerin kavitasyona Gram negatif bakterilerden daha dirençli olduğu belirtilmektedir [33].

Endüstriyel amaçlarla mikroorganizmaları inaktif hale getirmek için en etkili yaklaşımlar ultrasonun ısıyla (thermosonication, TS), basınçla (manosonication, MS) veya ısı ve basınçla (manothermosonication, MTS) birlikte kullanılmasıdır. Çeşitli çalışmalar TS, MS ve MTS'nin her bir muamele için tek başına uygulanmasına kıyasla ilave hatta sinerjik etkisi bulunduğunu göstermektedir [34]. Örneğin Czank ve ark. [35] insan sütünde *Escherichia coli* ve *Saccharomyces epidermis*'in inaktivasyonunda TS uygulamasının tek başına ultrason uygulamasına (150 W, 20 kHz) göre oldukça etkili olduğunu belirlemişlerdir. Lee ve ark. [36] fosfat tamponundaki (0.01 M, pH 7) *Escherichia coli*'nin inaktivasyonu üzerine 40, 47, 54 ve 61°C'de ve 100, 300, 400 ve 500 kPa'da ultrason, TS, MS ve MTS'nin (20 kHz, 124 µm genlik) etkilerini karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar öldürücü faktörlerin kombinasyonunun (ısı ve/veya ultrason, basınçla veya basınçsız) 5 log birimlik bir azalma gerçekleştirmek için gerekli muamele süresini önemli ölçüde kısalttığını ortaya koymuşlardır. *Escherichia coli*'nin TS ve MTS ile inaktivasyon oranlarının, ultrason ve MS ile elde edilenlere göre önemli düzeyde yüksek olduğu belirlenmiştir.

TS'nin etkinliği artan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu durum, buhar basıncındaki artış ve sıvı yüzey gerilimindeki azalmanın bir sonucu olarak kavitasyon etkisindeki azalmadan kaynaklanmaktadır [33]. Ancak, MS veya MTS ile bu etkinin üstesinden gelinebilmektedir. Bu yöntemler kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklarda kavitasyonun devam etmesine olanak sağlamakta, ultrasonla mikrobiyal inaktivasyon etkinliğini oldukça artırmaktadır [37]. Diğer taraftan, TS'nin süt işlemedeki uygulamaları ticari hale dönüştürülmeye gereksinim göstermektedir, çünkü süt ve süt ürünlerinin yüksek şiddetli ultrasonla muamele edilmesi istenmeyen lezzet oluşturma eğilimi göstermektedir [38].

UHT işlemine dayanıklı olan lipazlar ve proteazlar gibi ısıya dirençli enzimler ısı işlem görmüş süt ve diğer süt ürünlerinin kalitesini ve raf ömrünü azaltabilmektedir. Ancak, bu tür enzimler MTS ile sadece ısı işlem

uygulanmasına göre 10 kat daha hızlı inaktif hale gelmektedir. Genellikle, ultrasonun diğer uygulamalarla kombinasyonu enzim inaktivasyon etkinliğini arttırmada daha etkilidir. Özellikle, düşük şiddetli ultrason ve hafif ısı (TS) ve/veya basıncın (MS, MTS) eşzamanlı uygulanmasının gıdalardaki çeşitli enzimlerin inaktivasyon etkinliğini arttırdığı bildirilmektedir. Bununla birlikte, duyarlılık enzimden enzime değişebilmektedir [37]. TS'nin (150 W, 20 kHz, 120 µm genlik, 30-75.5°C, 40.2-102.3 saniye) süt enzimlerini (alkali fosfataz, laktoperoksidaz ve γ-glutamiltanspeptidaz) inaktif hale getirmede sadece ısı kullanımından daha etkili olduğu bildirilmiştir [33].

Diğer taraftan, daha hafif düzeylerde ultrason kullanımı süt fermantasyon işlemlerini desteklemede etkili olabilmektedir. Düşük şiddetli ultrason kullanımı fermantasyon tankı içerisindeki kütle transferini arttırmakta ve böylece enzim verimliliğini yükseltebilmektedir [6]. 100 kHz'in üzerindeki frekanslara sahip ultrason dalgalarının, hücrelere onarılabılır hasarlar veren stabil kavitasyon oluşturan düşük şiddet nedeniyle hücreler üzerinde hiçbir olumsuz etkiye yol açmadığı, mikrobiyal hücrelerin metabolik aktivitesini değiştirerek, bunların üremelerinin hızlanmasına ve daha fazla miktarda metabolizma ürününe neden olduğu bildirilmektedir [39]. Süt ürünleri fermantasyonunda ultrasonun çoğu yararlı etkisi, kısa sürelerde ve düşük frekanslarda ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, orta şiddette kısa süreli ultrason uygulaması, ultrasonun bazı olumsuz etkilerini ve enerji giderlerini minimize etmeye olanak sağlamaktadır [6].

### Ultrasonik Görüntüleme ve Proses Kontrolü

Ultrasonun sütle ilgili araştırmalar ve analizlerde analitik bir araç olarak kullanımının çok sayıda örnekleri bulunmaktadır. Örneğin, Corredig ve ark. [40] süt bileşenlerinin jelleşmesini izlemek amacıyla ultrasonik spektroskopiyi kullanmışlardır. Bu işlem, incelenen örneklerde farklı frekanslarda ultrasonik genliğin hızının ve sönümlenmesinin ölçümünü içermiştir. Wang ve ark. [41] ısıtma işleminden sonra kazein çözeltilerinin rennin ile pıhtılaşma özelliklerini belirlemek üzere düşük şiddetli ultrason kullanmışlardır. Ultrasonik görüntüleme çeşitli peynirlerde yapı gelişimini, peynir yapımında kesim zamanını, peynirlerin reolojik özelliklerini, ısıtma nedeniyle peynirdeki yapısal değişimleri ve peynir olgunluğunu incelemek amacıyla da kullanılmıştır [6].

Diğer taraftan, düşük şiddetli ve yüksek frekanslı ultrasonun gıda ve gıda üretim proseslerinin izlenmesinin iyileştirilmesinde endüstriyel olarak kullanılması da söz konusudur. Bu endüstriyel uygulamalar yumurta, et, meyve ve sebzeler, süt ürünleri ve diğer ürünlerin tekstür, viskozite ve konsantrasyonunun belirlenmesi; çeşitli proseslerin izlenmesi ve kontrolü amacıyla kalınlık, akış düzeyi ve sıcaklık ölçümlerini içermektedir [42].

### Ultrasonik Atomizasyon

Atomizörler süt ürünlerinin püskürtmeli kurutucuda kurutulması sırasında yüksek bir yüzey/kütle oranı

sağlayarak hızlı ısı transferine ve yüksek buharlaşma hızlarına imkan vermektedirler. Süt uygulamalarında kullanılan en yaygın iki atomizör santrifüj (döner) ve basınçlı (nozullu) atomizörlerdir. Ancak ultrasonik atomizörler de uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır. Bu noktada, sıvı bir beslemeyi titreşen bir borudan geçirerek aerosol oluşturan ultrasonik nozullar ile daha yüksek ultrasonik frekanslarda çalışan ve ince bir sıvı filmde fiskeye benzeri bir yapı oluşturan ultrasonik nebulizatörleri (sis haline getiriciler) birbirinden ayırmak gerekmektedir. Bir ultrasonik nebulizatörün oluşturduğu damlacık büyüklüğü, bir ultrasonik nozullardan elde edilene göre on kat daha küçüktür. Büyük ölçekli işlemler için nozul içeren ultrasonik püskürtmeli kurutucular mevcut olmasına rağmen, ultrasonik nebulizatörler büyük ölçekli sanayi kullanımı için henüz geliştirilmemiştir. Her iki cihaz da klasik püskürtmeli kurutma atomizörlerine göre teknik üstünlüğe sahiptir, şöyle ki çok daha düşük hızda bir sprey oluşturmaktadırlar. Bu durum, kurutma için gerekli püskürtme bölmesinin çok daha küçük olabilmesi anlamına gelmektedir [6]. Diğer atomizasyon yöntemleriyle kıyaslandığında, ultrasonik nozulların belirgin avantajlarından biri bu cihazlarda daha geniş bir deliğin kullanılabilmesidir ki bu delik nozul tipi atomizörlerdeki basınçlı akış için gereksinim duyulan küçük deliklere göre, tıkanmalara karşı daima daha az eğilimlidir [43].

### Fonksiyonel Özelliklerin Değiştirilmesi

Süt işletmelerinde peyniraltı suyu proteinleri çeşitli işlenmiş gıdalarda kullanılmak üzere konsantre edilmektedir. Bu işlem sırasında oldukça yüksek düzeylerde (ağırlıkça %4-15) protein içeren sulu peyniraltı suyu proteini çözeltileri ısıtma işlemi tabii tutulmaktadır. Protein çözeltilerinin önemli düzeyde artan viskozitesi ısıtma işlemi sırasında ve kullanılabilen toplam kurumada konsantrasyonunu sınırlamaktadır. Daha sonra viskozite ikincil süt ürünlerinin üretimi sırasında ikinci bir ısıtma işlemi daha da artmaktadır. Daha yüksek protein düzeylerinde (ağırlıkça %15'in üzerinde), bu ısıtma işlemleri jel oluşumuna yol açabilmektedir. Ashokkumar ve ark. [44] bu problemin üstesinden gelebilmek için yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Böyle bir ısıtma aşamasından sonra çok kısa süreli ultrason uygulaması bu agregatları parçalamakta ve sonraki ısıtma sırasında tekrar oluşmasını önlemekte, dolayısıyla genellikle bu işlemle ilişkili olan viskozite artışını azaltmaktadır. Araştırmacılar gözlenen viskozite azalmasını esasen akustik kavitasyon sırasında oluşan fiziksel kuvvetlere dayandırmışlardır. Ultrason uygulamasının süt ürünlerinde viskoziteyi azaltmasına ilişkin başka çalışmalar da mevcuttur. Deshpande ve Walsh [45] ultrason uygulamasının gerek kesikli gerekse sürekli sistemde rekonstitüye süt proteini konsantrasyonu ve rekonstitüye yağsız sütün viskozitesini önemli düzeyde düşürdüğünü ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar viskozitedeki azalmanın ultrason uygulaması nedeniyle protein agregatlarının parçalanmasıyla birlikte artan çözünürlüğün bir sonucu olabileceğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde, bir başka çalışmada düşük frekanslı (20 kHz) ultrason uygulamasının hem kesikli hem de sürekli

systemde yağsız süt konsantratinin viskozitesini düşürdüğü belirlenmiştir [46].

Süt ve süt ürünlerinde diğer önemli bir fonksiyonel özellik çözünürlüktür. Bu konuda yapılan bir çalışmada, 5 dakika süreyle 20 kHz frekansında yüksek şiddetli ultrason uygulamasının rekonstitüye süt proteini konsantratinin çözünürlüğünü önemli düzeyde arttırdığı (%35.78'den %88.30'a) belirlenmiştir. Bu etkinin globüler proteinlerin üç boyutlu yapısındaki değişimlerin bir sonucu olduğu değerlendirilmesinde bulunulmuştur [47]. Zhao ve ark. [48] da yaptıkları bir çalışmada 8.0-12.0 arasında değişen alkali pH değerlerine ayarlanmış süt proteini konsantrati, misel kazein konsantrati ve peyniraltı suyu proteini izolati çözeltilerine 5 dakika süreyle 20 kHz frekansında ultrason uygulamışlardır. Araştırmacılar uygulama sonucunda süt proteinlerinin çözünürlüğünün önemli düzeyde arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, söz konusu uygulamayla tüm örneklerde, süt ve ürünlerindeki diğer bir fonksiyonel özellik olan köpük oluşturma kapasitesinin yükseldiği ortaya konmuştur. Jiang ve ark. [49] tarafından yapılan bir araştırmada da peyniraltı suyu proteini izolatından hazırlanan dispersiyonlara 20 kHz frekansında farklı sürelerde ultrason uygulanmıştır. Çalışmada ultrason uygulanan dispersiyonun köpük oluşturma yeteneğinin, ultrason uygulanmamış dispersiyona göre %63 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Ultrason uygulaması kazein misellerini parçalamak ve daha küçük parçacıklar içeren süt elde etmek için de kullanılmaktadır. Bu uygulama sütün peynir mayasıyla pıhtılaşma yeteneğini arttırmaktadır [50]. Liu ve ark. [51] pH 6.7'deki rekonstitüye yağsız süte pıhtılaştırma öncesi 20 kHz ve 30°C'de ultrason uyguladıkları çalışmalarında, peynir mayasıyla pıhtılaşma özelliklerinin (pıhtılaşma süresi, pıhtı sıklığı vb.) ultrason uygulanmamış kontrol örneğine kıyasla iyileştiğini belirlemişlerdir. Araştırmacılar pıhtılaşma davranışındaki iyileşmenin süt proteinlerindeki ultrason kaynaklı değişimlerle ilişkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmaya benzer şekilde, Zhao ve ark. [50] pıhtılaştırma öncesinde yağsız keçi sütüne 20 kHz frekansında ultrason uygulamışlar ve ultrason uygulamasının keçi sütünün peynir mayasıyla pıhtılaşma özelliklerini geliştirdiğini belirlemişlerdir.

Yoğurdun fonksiyonel özelliklerini iyileştirmek amacıyla ultrasonun ısıyla (TS) veya ısı ve basınçla (MTS) bir arada kullanılmasıyla yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Riener ve ark. [52] tarafından, temin edildiği işletmede pastörizasyon (72°C'de 15 saniye süreyle) ve çift kademeli homojenizasyon (ilk kademede 150 bar, ikinci kademede 50 bar basınçla) işlemlerine tabi tutulmuş sütlerin kullanıldığı bir araştırma yapılmıştır. Çalışmada 45°C'de ön ısıtma uygulanmış farklı yağ oranlarına (%0.1, 1.5 ve 3.5) sahip sültere 10 dakika süreyle 24 kHz'lik ultrason frekansı kullanılarak TS uygulamasının, geleneksel yöntemle ısıtılan (90°C'de 10 dakika) süttten elde edilen kontrol yoğurtlarına göre daha üstün reolojik özelliklere sahip yoğurt üretimine olanak sağladığı ortaya konmuştur. Ayrıca TS uygulanmış sülterden elde edilen yoğurtların daha yüksek su tutma kapasitesi ve daha düşük

sinerezis gösteren daha güçlü jel yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, yoğurtlarda uygun fonksiyonel özellikler elde etmek amacıyla MTS kullanımı üzerinde yapılan bir çalışmada, süte MTS uygulamasının (12 saniye, 20 kHz ve 40°C), MTS uygulanmamış süttten elde edilen kontrol yoğurtlarına kıyasla üstün reolojik özelliklere sahip yoğurt eldesine imkan verdiği saptanmıştır. MTS uygulanmış süttten elde edilen yoğurtların neredeyse tüm reolojik parametreler açısından daha yüksek değerler göstermesine yol açan daha güçlü yapıya sahip olduğu ortaya konmuş ve MTS'nin yoğurt tekstürünü iyileştirmek için yararlı bir uygulama olabileceği ifade edilmiştir [53].

## SONUÇ

Ultrason uygulaması, geleneksel gıda işleme teknolojilerine göre daha düşük enerji gereksinimi göstermesi, gıdalarda minimum düzeylerde istenmeyen değişimlere yol açması, prosesleri hızlandırması, verimi arttırması, kullanım kolaylığı, insanlar için güvenli olması, çevre dostu olması gibi özellikleri nedeniyle gıda sanayisinde ve bu sanayinin önemli bir dalı olan süt sanayisinde gelecek vadededen bir teknolojidir. Bu teknoloji süt ve ürünlerinde yüksek şiddetli ve düşük şiddetli olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilmekte ve şiddete bağlı olarak ürünlerde birçok farklı etki ortaya koymaktadır. Ultrasonun ısıyla, basınçla ve hem ısı hem de basınçla bir arada kullanıldığı uygulamalar da mevcuttur ve genellikle bu durumda etkisi daha da artmaktadır. Süt işlemede yüksek şiddetli ultrason düşük şiddetli ultrasona göre çok daha fazla alanda (membran temizleme, gaz giderme, homojenizasyon, kristalizasyon, mikrobiyal inaktivasyon, fonksiyonel özelliklerin değiştirilmesi gibi) kullanılmaktadır. Ultrason teknolojisi, geleneksel gıda işleme yöntemleriyle kıyaslandığında birçok avantaja sahip olmasına rağmen büyük ölçekli sanayi prosesleri için geliştirilmeye gereksinim göstermektedir. Bu amaçla, her bir süt ürünüde söz konusu teknolojinin kullanımına ilişkin işlem koşullarının belirlenmesine yönelik olarak daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca, süt ve süt ürünleri üretim sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin, ultrason teknolojisinin geleneksel teknolojilerle kıyaslandığında sahip olduğu avantajlar hakkında bilinçlendirilmesinin ve sanayi ile işbirliği halinde yürütülecek çalışmaların da bu konuya katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Alzamora, S.M., Guerro, S.N., Lopez-Malo, A. (2000). Ultrasound as a Food Preservation Method. IFT Annual Meeting, USA.
- [2] Manas, P., Pagan, R., Raso, J., Sala, J.F., Condon, S.J. (2000). Inactivation of *Salmonella enteritidis*, *Salmonella typhimurium* and *Salmonella senftenberg* by ultrasonic waves under pressure. *Journal of Food Protection*, 63, 451-456.
- [3] Firouz, M.S., Farahmandi, A., Hosseinpour, S. (2019). Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices and dairy products



- industries: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57, 73-88.
- [4] Anonim.(2022). HART Design&Manufacturing Inc., <https://hartdesign.com/products/cutting/ultrasonic-bar-cutting/>, Erişim tarihi [27.10.2022].
- [5] Gallo, M., Ferrara, L., Naviglio, D. (2018). Application of ultrasound in food science and technology: A perspective. *Foods*, 7, 164.
- [6] Ashokkumar, M., Bhaskaracharya, R., Kentish, S., Lee, J., Palmer, M., Zisu, B. (2010). The ultrasonic processing of dairy products-An overview. *Dairy Science and Technology*, 90, 147-168.
- [7] Yu, Z., Su, Y., Zhang, Y., Zhu, P., Mei, Z., Zhou, X., Yu, H. (2021). Potential use of ultrasound to promote fermentation, maturation, and properties of fermented foods: A review. *Food Chemistry*, 357, 129805.
- [8] Bhat, Z.F., Morton, J.D., Bekhit, A.E.D.A., Kumar, S., Bhat, H.F. (2021). Effect of processing technologies on the digestibility of egg proteins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20, 4703-4738.
- [9] Chandrapala, J., Oliver, C., Kentish, S., Ashokkumar, M. (2012). Ultrasonics in food processing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19, 975-983.
- [10] Abesinghe, A.M.N.L., Islam, N., Vidanarachchi, J.K., Prakash, S., Silva, K.F.S.T., Karim, M.A. (2019). Effects of ultrasound on the fermentation profile of fermented milk products incorporated with lactic acid bacteria. *International Dairy Journal*, 90, 1-14.
- [11] Akdeniz, V., Akalın, A.S. (2019). New approach for yoghurt and ice cream production: High-intensity ultrasound. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 392-398.
- [12] Patist, A., Bates, D. (2008). Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 147-154.
- [13] Guimarães, J.T., Silva, E.K., Alvarenga, V.O., Costa, A.L.R., Cunha, R.L., Sant'Ana, A.S., Freitas, M.Q., Meireles, M.A.A., Cruz, A.G. (2018). Physicochemical changes and microbial inactivation after high-intensity ultrasound processing of prebiotic whey beverage applying different ultrasonic power levels. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44, 251-260.
- [14] Carrillo-Lopez, L.M., Garcia-Galicia, I.A., Tirado-Gallegos, J.M., Sanchez-Vega, R., Huerta-Jimenez, M., Ashokkumar, M., Alarcon-Rojo, A.D. (2021). Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105467.
- [15] Alventosa-deLara, E., Barredo-Damas, S., Alcaina-Miranda, M.I., Iborra-Clar, M.I. (2014). Study and optimization of the ultrasound-enhanced cleaning of an ultrafiltration ceramic membrane through a combined experimental-statistical approach. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 1222-1234.
- [16] Muthukumar, S., Yang, K., Seuren, A., Kentish, S., Ashokkumar, M., Stevens, G.W., Grieser, F. (2004). The use of ultrasonic cleaning for ultrafiltration membranes in the dairy industry. *Separation and Purification Technology*, 39, 99-107.
- [17] Kan, C-C., Genuino, D.A.D., Rivera, K.K.P., De Luna, M.D.G. (2016). Ultrasonic cleaning of polytetrafluoroethylene membrane fouled by natural organic matter. *Journal of Membrane Science*, 497, 450-457.
- [18] Luján-Facundo, M.J., Mendoza-Roca, J.A., Cuartas-Urbe, B., Álvarez-Blanco, S. (2016). Cleaning efficiency enhancement by ultrasounds for membranes used in dairy industries. *Ultrasonics Sonochemistry*, 33, 18-25.
- [19] Maskooki, A., Kobayashi, T., Mortazavi, S.A., Maskooki, A. (2008). Effect of low frequencies and mixed wave of ultrasound and EDTA on flux recovery and cleaning of microfiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 59, 67-73.
- [20] Windhab, E.J., Dressler, M., Feigl, K., Fischer, P., Megias-Alguacil, D. (2005). Emulsion processing from single-drop deformation to design of complex processes and products. *Chemical Engineering Science*, 60, 2101-2113.
- [21] Akdeniz, V., Akalın, A.S. (2020). The effect of high power ultrasound on the milk homogenization efficiency and milk fat globule size compared to conventional homogenization. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(1), 252-259.
- [22] Akdeniz, V., Akalın, A.S. (2022). Power ultrasound affect on physicochemical, rheological and sensory characteristics of probiotic yoghurts. *International Dairy Journal*, 105530.
- [23] Paniwnyk, L. (2017). Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 794-806.
- [24] Gregersen, S.B., Frydenberg, R.P., Hammershøj, M., Dalsgaard, T.K., Andersen, U., Wiking, L. (2019). Application of high intensity ultrasound to accelerate crystallization of anhydrous milk fat and rapeseed oil blends. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 121, 1800200.
- [25] Martini, S., Suzuki, A.H., Hartel, R.W. (2008). Effect of high intensity ultrasound on crystallization behavior of anhydrous milk fat. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85, 621-628.
- [26] Batghare, A.H., Roy, K., Moholkar, V.S. (2020). Investigations in physical mechanism of ultrasound-assisted antisolvent batch crystallization of lactose monohydrate from aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105127.
- [27] Sánchez-García, Y.I., García-Vega, K.S., Leal-Ramos, M.Y., Salmeron, I., Gutiérrez-Méndez, N. (2018). Ultrasound-assisted crystallization of lactose in the presence of whey proteins and κ-carrageenan. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 714-722.
- [28] Villamiel M., Verdurmen R., de Jong P. (2000). Degassing of milk by high-intensity ultrasound. *Milchwissenschaft*, 55, 123-125.
- [29] Riera, E., Gallego-Juarez, J.A., Mason, T.J. (2006). Airborne ultrasound for the precipitation of smokes

- and powders and the destruction of foams. *Ultrasonics Sonochemistry*, 13, 107-116.
- [30] Bevilacqua, A., Campaniello, D., Speranza, B., Altieri, C., Sinigaglia, M., Corbo, M.R. (2019). Two nonthermal technologies for food safety and quality-Ultrasound and high pressure homogenization: Effects on microorganisms, advances, and possibilities: A review. *Journal of Food Protection*, 82(12), 2049–2064.
- [31] Akdeniz, V., Akalın, A.S. (2022). Recent advances in dual effect of power ultrasound to microorganisms in dairy industry: activation or inactivation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(4), 889-904.
- [32] Lopez-Gomez, A., Fernandez, P.S., Palop, A., Periago, P.M., Martinez-Lopez, A., Marin-Iniesta, F., Barbosa-Canovas, G.V. (2009). Food safety engineering: An emergent perspective. *Food Engineering Reviews*, 1, 84-104.
- [33] Villamiel, M., de Jong, P. (2000). Inactivation of *Pseudomonas fluorescens* and *Streptococcus thermophilus* in Trypticase soy broth and total bacteria in milk by continuous-flow ultrasonic treatment and conventional heating. *Journal of Food Engineering*, 45, 171-179.
- [34] Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., Lee, D-U. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 15, 261-266.
- [35] Czank, C., Simmer, K., Hartmann, P. E. (2010). Simultaneous pasteurization and homogenization of human milk by combining heat and ultrasound: effect on milk quality. *Journal of Dairy Research*, 77, 183-189.
- [36] Lee, H., Zhou, B., Liang, W., Feng, H., Martin, S.E. (2009). Inactivation of *Escherichia coli* cells with sonication, manosonication, thermosonication, and manothermosonication: microbial responses and kinetics modeling. *Journal of Food Engineering*, 93, 354-364.
- [37] Chandrapala, J., Oliver, C., Kentish, S., Ashokkumar, M. (2012). Ultrasonics in food processing-Food quality assurance and food safety. *Trends in Food Science and Technology*, 26, 88-98.
- [38] Riener, J., Noci, F., Cronin, D.A., Morgan, D.J., Lyng, J.G. (2009). Characterisation of volatile compounds generated in milk by high intensity ultrasound. *International Dairy Journal*, 19, 269-272.
- [39] Huang, G., Chen, S., Dai, C., Sun, L., Sun, W., Tang, Y., Xiong, F., He, R., Ma, H. (2017). Effects of ultrasound on microbial growth and enzyme activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 144-149.
- [40] Corredig, M., Alexander, M., Dalgleish, D.G. (2004). The application of ultrasonic spectroscopy to the study of the gelation of milk components. *Food Research International*, 37, 557-565.
- [41] Wang, Q., Bulca, S., Kulozik, U. (2007). A comparison of low-intensity ultrasound and oscillating rheology to assess the renneting properties of casein solutions after UHT heat pre-treatment. *International Dairy Journal*, 17, 50-58.
- [42] Ertugay, M.F., Şengül, M., Şengül, M. (2004). Effect of ultrasound treatment on milk homogenisation and particle size distribution of fat. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 28, 303-308.
- [43] O'Sullivan, J.J., Norwood, E-A, O'Mahony, J.A., Kelly, A.L. (2019). Atomisation technologies used in spray drying in the dairy industry: A review. *Journal of Food Engineering*, 243, 57-69.
- [44] Ashokkumar, M., Lee, J., Zisu, B., Bhaskarcharya, R., Palmer, M., Kentish, S. (2009). Sonication increases the heat stability of whey proteins. *Journal of Dairy Science*, 92, 5353-5356.
- [45] Deshpande, V.K., Walsh, M.K. (2018). Effect of sonication on the viscosity of reconstituted skim milk powder and milk protein concentrate as influenced by solids concentration, temperature and sonication. *International Dairy Journal*, 78, 122-129.
- [46] Zisu, B., Schleyer, M., Chandrapala, J. (2013). Application of ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk. *International Dairy Journal*, 31(1), 41-43.
- [47] Yanjun, S., Jianhang, C., Shuwen, Z., Hongjuan, L., Jing, L., Lu, L., Uluko, H., Yanling, S., Wenming, C., Wupen, G., Jiaping, L. (2014). Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 124, 11-18.
- [48] Zhao, X., Fan, X., Shao, X., Cheng, M., Wang, C., Jiang, H., Zhang, X., Yuan, C. (2022). Modifying the physicochemical properties, solubility and foaming capacity of milk proteins by ultrasound-assisted alkaline pH-shifting treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 88, 106089.
- [49] Jiang, Z., Wang, C., Li, T., Sun, D., Gao, H., Gao, Z., Mu, Z. (2019). Effect of ultrasound on the structure and functional properties of transglutaminase-crosslinked whey protein isolate exposed to prior heat treatment. *International Dairy Journal*, 88, 79-88.
- [50] Zhao, L., Zhang, S., Uluko, H., Liu, L., Lu, J., Xue, H., Kong, F., Lv, J. (2014). Effect of ultrasound pretreatment on rennet-induced coagulation properties of goat's milk. *Food Chemistry*, 165, 167-174.
- [51] Liu, Z., Juliano, P., Williams, R.P.W., Niere, J., Augustin, M.A. (2014). Ultrasound improves the renneting properties of milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 2131-2137.
- [52] Riener, J., Noci, F., Cronin, D.A., Morgan, D.J., Lyng, J.G. (2010). A comparison of selected quality characteristics of yoghurts prepared from thermosonicated and conventionally heated milks. *Food Chemistry*, 119(3), 1108-1113.
- [53] Vercet, A., Oria, R., Marquina, P., Crelier, S., Lopez-Buesa, P. (2002). Rheological properties of yoghurt made with milk submitted to manothermosonication. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6165-6171.