



محمود سلطانی فیروز

عضو هیئت علمی گروه مهندسی ماشین‌های
کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گلستان کشاورزی و
منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج

✉ mahsoltani@ut.ac.ir

فراصوت

یک فناوری سبز و نوین در ماشین‌ها و تجهیزات صنایع غذایی



چکیده

فراصوت پر شدت (HIUS) یک فناوری سبز است که می‌تواند منجر به بهبود نرخ انتقال حرارت و جرم، ارائه یک تکنیک پردازش سریع‌تر و محدود کردن هزینه‌های تولید با افزایش بازده فرآیند شود. در فرآوری مواد غذایی، فراصوت به عنوان یک فناوری نوین امیدوارکننده برای سرعت بخشیدن به فرآیندها و تولید محصولات باکیفیت بالا در نظر گرفته می‌شود. این مقاله کاربردهای اخیر HIUS را برای فرآوری محصولات غذایی و مزایا و معایب این فناوری را ذکر می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که HIUS به دلیل اثرات مثبت آن بر کیفیت و حفظ خواص غذایی اولیه و ویژگی‌های حسی، ابزار مفیدی برای فرآوری محصول غذایی است. با مطالعه آخرین تحقیقات و پیشرفت‌ها در زمینه‌های کاربردهای فراصوت، تأیید شده است که این تکنیک می‌تواند در تسریع فرآیندها، کاهش انرژی مورد نیاز، افزایش بهره‌وری و تولید مواد غذایی باکیفیت بهتر مفید باشد. با وجود این، به منظور حل چالش‌های پیش رو و برای کاربردهای بالقوه فناوری HIUS، تحقیقات بیشتری در زمینه‌های ذکر شده باید گسترش یابد. همچنین با پیشرفت تکنولوژی، تجهیزات پیشرفته‌تر، مبدل‌های فراصوت و ابزار دقیق‌تری معرفی می‌شوند که برای رفع چالش‌های کنونی باید در این زمینه به کار گرفته شوند؛ بنابراین تحقیقات آینده منجر به ارتقا و صنعتی شدن این فناوری خواهد شد.

کلمات کلیدی: فراصوت، کاویتاسیون، بهبود فرآیند، افزایش کیفیت.



مقدمه

فراصوت یک فناوری نوآورانه و مبتنی بر کاربرد امواج مکانیکی با فرکانس ۲۰ kHz تا ۱۰ MHz است که می‌توان آن را در دو محدوده طبقه‌بندی کرد: فراصوت با شدت پایین^۱ (LIUS) که از فرکانس‌های در محدوده ۱۰۰ kHz تا ۱۰ MHz استفاده می‌کند و در شدت‌های کمتر از 1 W.cm^{-2} به کار گرفته می‌شود، درحالی‌که فراصوت پرشدت^۲ (HIUS) از شدت‌های بالاتر از 1 W.cm^{-2} در فرکانس‌های پایین بین kHz ۲۰ تا ۱۰۰ kHz استفاده می‌کند [۱]. HIUS توانایی تغییر خواص شیمیایی و فیزیکی مواد غذایی در فیلتراسیون، خشک کردن، استریل کردن، استخراج، نگهداری مواد غذایی، امولسیون کردن و غیره را دارد [۲]. از مزایای کاربرد HIUS در ماشین‌های صنایع غذایی می‌توان به افزایش راندمان، بهبود انتقال جرم و حرارت، کاهش زمان پردازش، افزایش اختلاط فیزیکی، کاهش دمای فرآوری، استخراج انتخابی و افزایش عملکرد اشاره کرد. علاوه بر این، HIUS می‌تواند در استراتژی «فناوری‌های سبز در تولید غذای سبز» به‌عنوان ابزاری کارآمد برای اطمینان از تولید باکیفیت بالا و ایمن مواد غذایی استفاده شود.

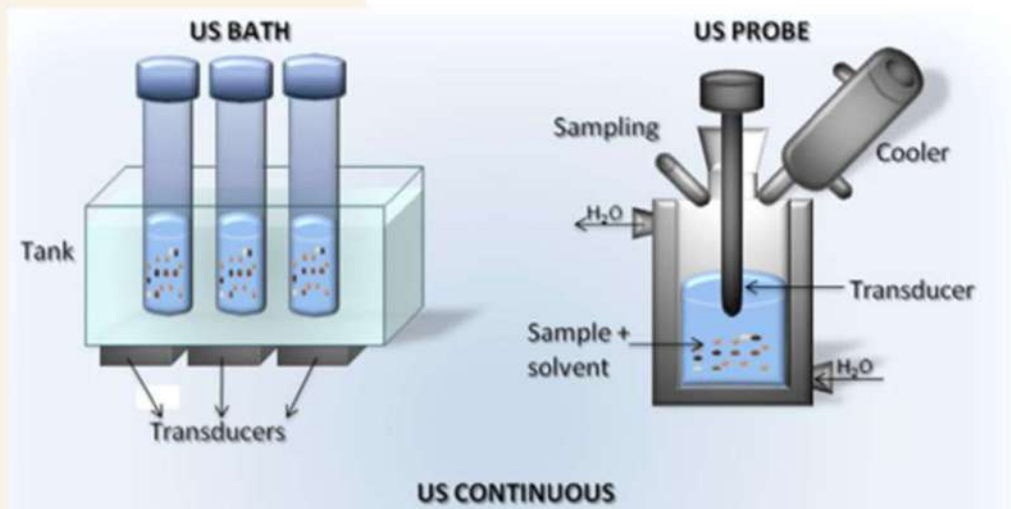
در میان فناوری‌های نوین فرآوری مواد غذایی، HIUS به دلیل عملکرد ساده، کنترل آسان، اثرات مطلوب بر خواص فیزیکوشیمیایی مواد غذایی و شرایط عملیاتی ملایم موردتوجه دانشمندان قرار گرفته است. این فناوری از امکان دستیابی به تولید صنعتی [۳] برخوردار است و پتانسیل بالایی برای افزایش مقیاس برای تولید انبوه محصولات غذایی دارد. با ترکیب مزایای HIUS با سایر فناوری‌های سنتی برای فرآوری محصولات غذایی، سیستم‌های جدیدی در مقیاس تحقیقاتی و نمونه اولیه طراحی می‌شوند که با رفع اشکالات و بهینه‌سازی، می‌توان این سیستم‌ها را برای تولید صنعتی تجاری کرد [۴].

در اکثر موارد، HIUS باید به‌عنوان یک فناوری کمکی در نظر گرفته شود که عملکرد فرآوری اصلی را تشدید می‌کند. به‌عنوان مثال، در پاستوریزاسیون حرارتی، اثر HIUS بر غیرفعال سازی میکروبی در دماهای پایین‌تر از روش مرسوم کارآمدتر است که به حفظ کیفیت شیر به کاهش دلتا توره شدن پروتئین کمک می‌کند [۴]: بنابراین به نظر می‌رسد HIUS پتانسیل بالایی در تسریع و بهبود فرآورده‌های غذایی و همچنین به حداقل رساندن تلفات کیفیت محصول و تخریب ناشی از چنین فرآورده‌هایی دارد. از این رو، نیاز زیادی به تحقیقات مستمر در مورد توسعه فرآورده‌های به کمک HIUS وجود دارد.

تجهیزات فراصوت و مکانیسم اثر

حمام فراصوت و پروب فراصوت (شکل ۱) انواع اصلی دستگاه‌های HIUS هستند که برای فرآوری محصولات غذایی استفاده می‌شوند. این دستگاه‌ها را می‌توان به‌صورت جداگانه مورد استفاده قرار داد و یا با سایر سیستم‌های معمولی ادغام کرد.

سیستم پروب فراصوت که معمولاً در محدوده ۲۰ kHz کار می‌کند دارای چندین بخش مانند مبدل است که به یک پروب متصل می‌شود و یک تقویت‌کننده که شدت فراصوت را افزایش می‌دهد [۵]. پروب فراصوت معمولاً از تیتانیوم ساخته می‌شود و مستقیماً امواج صوتی را از طریق یک شیپوری فراصوت در محیط مایع منتشر می‌کند. پروب سیستم فراصوت را می‌توان بر روی واحدهای فرآوری نصب و با آن‌ها هماهنگ کرد. درحالی‌که حمام فراصوت به‌طور غیرمستقیم نمونه را با استفاده از مبدل‌های ساندویچی نصب‌شده در خارج از دیواره مخزن، فراصوت‌دهی می‌کند. معمولاً در فراصوت‌دهی محصول جامد از یک محیط واسط مایع استفاده می‌شود که اغلب آب است.



شکل ۱
پروپ و حمام فراصوت
در فرآوری محصولات
غذایی [۱۰]

این پدیده منجر به افزایش دما تا چند هزار کلوین و فشار تا چند صد بار در ناحیه انفجار در ابعاد میکروسکوپی می‌شود.

هنگامی که امواج فراصوت از میان مولکول‌های مایع عبور می‌کنند، با نیروهای مکانیکی مواجه می‌شوند. امواج از طریق محیط به‌عنوان مجموعه‌ای از سیکل‌های فشرده سازی و رقیق سازی عبور می‌کنند. فشار مثبت اجزای ماده را فشرده می‌کند و فشار منفی باعث اتساع مولکول‌ها می‌شود. این سیکل به‌طور مکرر اتفاق می‌افتد تا زمانی که یک حفره در نتیجه واکنش بین اتساع و نیروی جاذبه مولکول‌ها ایجاد شود. سپس، اندازه حفره‌ها در سیکل‌های متوالی گسترش می‌یابد که در نهایت حباب‌های کاویتاسیون تولید می‌شوند [۱۱]. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، یک میکرو حباب تشکیل می‌شود، به دلیل انتشار یک‌طرفه و ادغام حباب-حباب شروع به رشد می‌کند و در نهایت به نقطه بحرانی به نام تشدید می‌رسد. در تشدید، ریز حباب ممکن است ناپایدار شود و به‌شدت در یک یا تعداد کمی از سیکل‌های صوتی به نام کاویتاسیون گذرا فروریزش کند و یا برای بسیاری از سیکل‌ها در اطراف اندازه تشدید که کاویتاسیون پایدار نامیده می‌شود، نوسان کند.

یکی از نقاط ضعف حمام فراصوت میرایی و کاهش شدت امواج فراصوت توسط آب داخل حمام است، یکی دیگر از معایب حمام فراصوت نسبت به سیستم‌های پروپ، پایین بودن توان تحویلی به مواد هدف است [۶]. فراصوت در منطقه وسیع‌تری پراکنده است و بنابراین شدت توان آن تقریباً ۱۰۰ برابر کمتر از سیستم پروپ است [۷].

حمام فراصوت ابزار قدرتمندی نیست و در آن قدرت فراصوت داده‌شده توسط حمام فراصوت معمولی بین ۱ تا 5 W.cm^{-2} است. پارامترهای مؤثری که باید در هنگام استفاده از حمام فراصوت در نظر گرفته شوند عبارت‌اند از: حجم مایع، زمان تیماردهی، دمای مایع داخل حمام، فرکانس و موقعیت نمونه داخل حمام [۸]. اخیراً دستگاه‌های حمام با ویژگی‌های فرکانس چندگانه فراصوت در فرآوری مواد غذایی به کار می‌روند که هم‌زمان با استفاده از مبدل‌های فراصوت با فرکانس‌های مختلف، به ترتیب در پایین و کنار کار می‌کنند که نتیجه آن یک توزیع یکنواخت توان فراصوت است [۹].

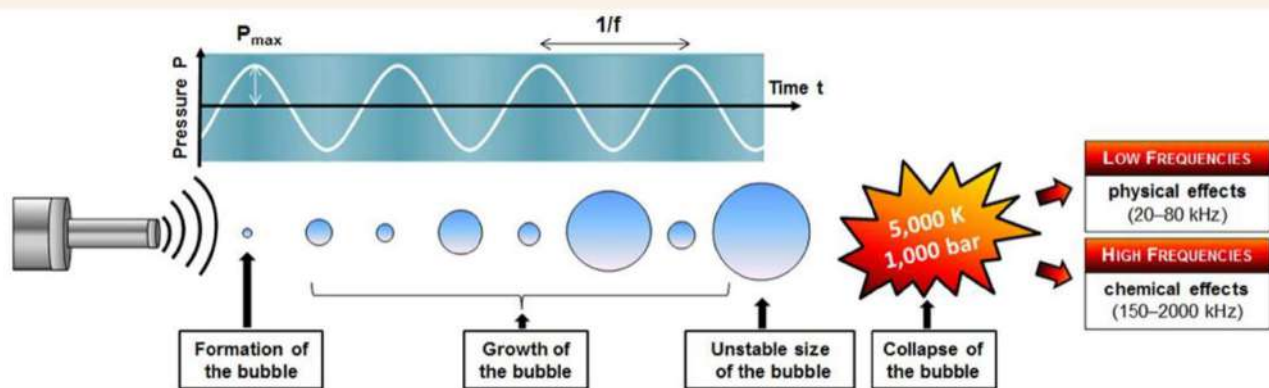
مهم‌ترین پدیده‌ای که در فرایند فراصوت‌دهی محصول اتفاق می‌افتد، کاویتاسیون یا حفره‌زایی است. این پدیده عبارت است از تشکیل، رشد و فروپاشی حباب‌ها حاوی گاز در محیط مایع. فروریزش حباب ایجادشده یک انفجار میکروسکوپی است که باعث ایجاد تلاطم شدید موضعی و آزاد شدن انرژی گرمایی می‌شود.

کاربرد فراصوت در صنایع گوشت

خواص بیوشیمیایی و همچنین قدرت و زمان فراصوت بستگی دارد [۱۶].

انجماد یکی از سنتی‌ترین فرآیندهای نگهداری گوشت است که با مهار رشد میکروبی و کاهش واکنش‌های شیمیایی و آنزیمی، ماندگاری گوشت را افزایش می‌دهد تا خواص غذایی اولیه و ویژگی‌های حسی آن را حفظ کند. مشخص شده است که کیفیت محصولات غذایی از جمله رنگ، مواد مغذی و خواص بافت تابعی از نرخ انجماد است [۱۳]. در روش‌های مرسوم، مشکلات انجماد زمانی رخ می‌دهد که سرعت انجماد کم باشد، در این حالت کریستال‌های یخ بزرگ و دارای لبه‌های تیز هستند که معمولاً در فضای بین سلولی تشکیل می‌شوند و باعث آسیب سلولی می‌شوند، در نهایت این امر منجر به تخریب محصول می‌شود. فراصوت به عنوان یک فناوری تکمیلی برای بهبود عملکرد انجماد و ذوب محصولات گوشتی عمل می‌کند. هنگامی که سرعت انجماد زیاد است، از آنجایی که سرعت انتقال حرارت بالا است و زمان کافی برای خروج آب از بافت گوشت وجود ندارد، کریستال‌ها در اندازه‌های کوچک‌تر، یکنواخت‌تر و تعداد بیشتری در داخل و خارج سلول تولید می‌شوند؛ بنابراین از کاهش کیفیت محصول جلوگیری می‌کند. یکی از روش‌هایی که می‌تواند در کاهش اندازه بلورهای یخ و افزایش هسته‌زایی بسیار مفید باشد، HIUS است.

در سال‌های اخیر، محققان بر روی مطالعه اثرات HIUS بر فرآوری گوشت تازه از جمله انتقال جرم، نرم کردن گوشت، انجماد و یخ‌زدایی تمرکز کرده‌اند. در فرآوری گوشت، HIUS می‌تواند غشای سلولی را تغییر دهد و به نرم کردن بافت‌ها کمک کند. لطافت، آبدار بودن و طعم و همچنین خواص ارگانولپتیک از عوامل اصلی کیفیت گوشت هستند. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که HIUS تأثیر مثبتی بر کیفیت گوشت دارد [۱۳، ۱۴]. باین‌حال، گزارش‌هایی از اثرات نامطلوب این فناوری بر خواص ارگانولپتیک و فیزیکوشیمیایی گوشت وجود دارد. به عنوان مثال، اکسیداسیون لیپید در فرآوری گوشت به طور کلی منجر به تولید طعم‌های بد و بدبو می‌شود که منجر به خواص حسی نامطلوب می‌شود. ثابت شده است که HIUS اکسیداسیون لیپید و پروتئین را تشدید می‌کند [۱۵]. پروب فراصوت ۲۰ kHz باعث تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود، این پدیده منجر به اکسیداسیون پروتئین‌ها در گوشت گاو و از بین رفتن حلالیت اجزای میوفیبریل می‌شود [۱۵]. موضوعی که باید به آن توجه شود این است که انرژی جذب شده HIUS ممکن است منجر به افزایش تولید گرما تا دماهای بالا و متعاقباً آسیب حرارتی به گوشت شود. اثرات HIUS بر ظرفیت نگهداری آب گوشت را می‌توان مثبت یا منفی ارزیابی کرد، تغییرات به نوع و جهت الیاف، خواص



شکل ۲

نمایش شماتیک پدیده کاونتاسیون در محیط مایع [۱۲].

HIUS فرآیند تبلور را با هسته‌زایی و شکستن کریستال‌های یخ ارتقا می‌دهد. HIUS می‌تواند تعداد زیادی حباب کاویتاسیون ایجاد کند که به‌عنوان هسته برای تشکیل کریستال‌های یخ عمل می‌کنند؛ بنابراین، HIUS به حفظ کیفیت گوشت منجمد با افزایش نرخ انجماد و بهبود تشکیل کریستال‌های کوچک و حتی یکنواخت یخ کمک می‌کند [۱۷]. HIUS همچنین می‌تواند به‌طور مؤثر سرعت انتقال حرارت همرفتی را افزایش دهد و حرکت سریع حباب‌های حفره‌زایی نیز انتقال گرما و جرم را افزایش می‌دهد. حباب‌های حفره‌زایی، کریستال‌های یخ را به اندازه‌های کوچک‌تر می‌شکنند، این کریستال‌های خردشده به‌عنوان هسته‌های جدید عمل می‌کنند که منجر به افزایش تصاعدی در سرعت انجماد می‌شود.

تغییر فاز مولکول‌های آب یک رویداد مهم است که منجر به آزاد شدن گرمای نهان و متعاقب آن تبلور مولکول‌ها می‌شود. استفاده از HIUS در این زمان می‌تواند سرعت هسته‌زایی و رشد کریستال را به‌شدت بهبود بخشد و منجر به تولید کریستال‌های یخ با توزیع یکنواخت‌تر و کوچک‌تر شود که دو عامل مهم بر کیفیت بافت‌های گوشت منجمد هستند؛ بنابراین، HIUS تأثیر مثبتی بر کیفیت گوشت در طول انجماد دارد.

اعمال شدت‌های فراصوت بیشتر از مقدار بهینه منجر به تولید گرما و طولانی شدن مرحله انتقال فاز می‌شود. دلیل دیگر می‌تواند کاهش سطح تماس در فصل مشترک مایع خنک‌کننده/گوشت باشد که به دلیل حباب‌های کاویتاسیون بیش‌ازحد ایجاد می‌شود؛ بنابراین، بیشترین توزیع یکنواخت کریستال‌های یخ و کمترین آسیب ساختاری گوشت در قدرت HIUS بهینه به دست می‌آید. با توجه به تفاوت‌های ساختاری، فیزیکوشیمیایی و فیزیکی-مکانیکی در محصولات گوشتی، فرکانس، قدرت و شدت HIUS مناسب برای هر محصول ممکن است متفاوت باشد.

بنابراین، برای انتخاب پارامترهای فراصوتی بهینه، باید آزمایش‌های انحصاری برای بهینه‌سازی انجماد به کمک HIUS انجام شود؛ اما بیشتر پژوهشگران فراصوت تک فرکانس را در انجماد گوشت و فرآورده‌های گوشتی اعمال کردند. در این‌گونه مطالعات، قدرت و شدت فراصوت اغلب به‌عنوان متغیر و فرکانس فراصوت به‌عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته‌شده است. اخیراً، سیستم فراصوت چند فرکانسی برای انجماد گوشت استفاده‌شده است. ما و همکاران [۳] اثرات HIUS چند فرکانس را بر روی نرخ‌های انجماد، ویژگی‌های کیفی و ساختار ماهی مورد مطالعه قراردادند، به این دلیل که فراصوت چند فرکانس نتایج بهتری نسبت به فراصوت تک فرکانس بر روی نرخ انجماد، خواص کیفی و ریزساختار گوشت ارائه می‌دهد.

محصولات گوشتی منجمد معمولاً برای مصرف و فرآوری‌های بعدی نیاز به یخ‌زدایی دارند. روش‌های یخ-زدایی مرسوم معمولاً مبتنی بر هوای گرم، آب گرم و خلأ هستند. این روش‌ها بر کیفیت گوشت منجمد تأثیر می‌گذارند. از معایب اصلی این روش‌ها می‌توان به راندمان پایین، مصرف انرژی و زمان زیاد و افت کیفیت اشاره کرد. یک فرآیند یخ‌زدایی ناکارآمد معمولاً کیفیت گوشت را بدتر و رشد و فعالیت میکروبی را تسریع می‌کند. روش‌های یخ-زدایی مرسوم دارای معایبی از جمله تولید شیرابه و همچنین دنا‌توره شدن شدید پروتئین هستند. در یخ‌زدایی گوشت، غشای سلولی آسیب‌دیده مایع درون‌سلولی را به بیرون نشد می‌دهد و از طرف دیگر، آب نگه‌داشته شده توسط نیروی موئینگی به دلیل از بین رفتن فیبرهای عضلانی کاهش می‌یابد. HIUS به‌عنوان یک فناوری کمکی توجه دانشمندان را برای غلبه بر معایب ذکرشده جلب کرده است. یخ‌زدایی با کمک فراصوت به‌عنوان یکی از کاربردهای مفید فراصوت در تجهیزات صنایع غذایی، یک فناوری نوآورانه است که به کمک گرمای تولیدشده در مواد غذایی منجمد به تسریع سرعت ذوب و همچنین حفظ خواص کیفی اولیه آن کمک می‌کند. HIUS با ایجاد

فروپاشی حباب‌های حفره‌زایی انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد و بر این اساس فرآیند یخ‌زدایی را کوتاه می‌کند. عوامل متعددی از جمله فرکانس و شدت فراصوت و ترکیب و ساختار محصول بر فرآیند یخ‌زدایی تأثیر می‌گذارد. مهم‌ترین موضوع در این زمینه، طراحی و ساخت سونوترودهای چند فرکانسی است.

اثر فراصوت در محدوده ۲۵ kHz بر سرعت و زمان ذوب گوشت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که منجر به کاهش ۸۷٪ زمان مورد نیاز برای ذوب در مقایسه با روش استاندارد شد، در حالی که بافت و خواص عملکردی گوشت در پایان فرآیند بدون آسیب باقی ماند [۱۸]. در طول فرآیند یخ‌زدایی، حفره‌زایی فراصوتی می‌تواند ریزساختار گوشت را تغییر دهد، بنابراین بهینه‌سازی فرآیند یخ‌زدایی با کمک فراصوت برای گوشت اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. توان فراصوت بیشتر از مقدار بهینه ممکن است اثر مضر بر بافت و ساختار گوشت داشته باشد. مصرف انرژی بیشتر و گرمای بیش‌ازحد نیز از جمله اثرات منفی توان‌های فراصوت بیشتر از بهینه است.

چالش‌هایی در انجماد و یخ‌زدایی به کمک فراصوت وجود دارند که می‌توان به این موارد زیر اشاره کرد: گرمای تولیدشده توسط اثر حرارتی فراصوت توسط محیط مایع جذب می‌شود؛ که می‌تواند برخی از اثرات مثبت فراصوت را خنثی کند و حتی بر روند و سرعت انجماد تأثیر منفی بگذارد. اگر فراصوت‌دهی در حالت پیوسته باشد، می‌تواند گرمای زیادی ایجاد کند که از تشکیل کریستال‌های یخ جلوگیری می‌کند.

توزیع غیریکنواخت توان فراصوت در سیستم انجماد باعث توزیع نامتعادل HIUS در قسمت‌های مختلف محصول می‌شود. از آنجایی که مدت زمان طولانی فراصوت‌دهی به دلیل تولید گرما برای هسته‌زایی نامطلوب است، فراصوت‌دهی کوتاه‌مدت نیز منجر به هسته‌زایی ناکافی می‌شود؛ بنابراین، بهینه‌سازی مدت زمان تیماردهی فراصوت برای کاربردهای مختلف اجتناب‌ناپذیر است.

فرآورده‌های گوشتی معمولاً موادی غیر همگن و بسیار میرا هستند که به دلیل عدم توانایی در نفوذ به قسمت‌های داخلی محصول و جذب HIUS توسط لایه‌های بیرونی، انتقال امواج فراصوت به لایه‌های درونی را با مشکل مواجه می‌کنند. گرمایش موضعی و گرمای بیش‌ازحد یک پدیده رایج در فراصوت است. در حین ذوب، به دلیل گرمای بیش‌ازحد ناشی از HIUS، افزایش سریع و موضعی دما ممکن است روی سطح گوشت منجمد اتفاق بیفتد که منجر به سوختگی سطحی می‌شود، در حالی که قسمت داخلی محصول هنوز ذوب نشده است. استانداردسازی فرآیند انجماد به کمک HIUS و متغیرهای محصول یک چالش بزرگ برای تجاری‌سازی این فناوری است. پارامترهای فراصوت و متغیرهای وابسته به محصول در مطالعات تحقیقاتی معمولاً متفاوت هستند و طبق یک پروتکل استاندارد تعریف نمی‌شوند. تفاوت در فرکانس، قدرت و شدت فراصوت و همچنین مدت زمان و نحوه تیماردهی در مطالعات منجر به نتایج متفاوتی می‌شود که صنعتی شدن این فناوری را برای یک محصول خاص دشوار می‌کند. خواص محصول (شامل ترکیب عضله و نوع عضله، ویژگی‌های ابعادی و غیره) و محیط خنک‌کننده و خواص آن (ویسکوزیته، دمای کار و غیره) نیز برای استانداردسازی لازم است تا بتوان این فناوری را به سطوح صنعتی ارتقا داد.

با توجه به موارد ذکرشده، ایجاد سیستم‌های انجمادی با توزیع یکنواخت توان و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی ضروری است. مطالعات بیشتر و بهینه‌سازی چنین سیستم‌هایی به استفاده از این فناوری در مقیاس‌های بزرگ‌تر برای کاربردهای تجاری کمک می‌کند. اگرچه پیشرفت قابل توجهی در زمینه انجماد/یخ‌زدایی به کمک فراصوت حاصل شده است، این فناوری هنوز در مقیاس آزمایشگاهی است، باید تلاش‌های بیشتری برای افزایش مقیاس و مناسب‌سازی برای کاربردهای تجاری انجام شود.

کاربرد فراصوت در صنایع لبنی

شیر به عنوان یکی از کامل ترین غذاها جایگاه ویژه‌ای در رژیم غذایی انسان دارد. این غذای باکیفیت حاوی هر سه ماده مغذی ضروری برای بدن از جمله کربوهیدرات، چربی و پروتئین است. کربوهیدرات اصلی شیر لاکتوز است. شیر گاو حاوی حدود ۴۸٪ لاکتوز است، درحالی که مقدار کمی گالاکتوز، گلوکز و الیگوساکارید در آن وجود دارد. چربی شیر یک لیپید پیچیده است که به صورت امولسیون روغن در آب وجود دارد. شیر گاو حدود ۳،۵-۴٪ چربی دارد. لیپیدهای شیر عمدتاً تری اسیل گلیسرول یا استرهای اسید چرب همراه با گلیسرول هستند. محتوای پروتئین شیر گاو حدود ۳،۲٪ است که ۸۰٪ آن کازئین و ۲۰٪ پروتئین آب پنیر است [۱۹]؛ بنابراین، محتوای بالای مواد مغذی شیر، آن را به بستری مطلوب برای رشد میکروبی تبدیل می‌کند [۲۰] که تا حد زیادی بر ماندگاری آن تأثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه شیر دارای ترکیبات پیچیده و حساسی است؛ بنابراین باید توجه داشت که فرآوری ممکن است منجر به تغییرات فیزیکوشیمیایی و خواص ارگانولپتیکی نامطلوب محصول نهایی شود که یکی از بارزترین و مهم ترین اثرات این گونه فرآوری‌ها نارضایتی مصرف کننده است. امروزه سعی می‌شود فناوری‌های نوظهور غیرحرارتی جایگزین تکنیک‌های فرآوری حرارتی مرسوم در صنایع لبنی شود. این فناوری‌ها معمولاً شامل زمان پردازش کوتاه تر و هزینه کمتر و مصرف انرژی و اثرات نامطلوب کمتر بر محصولات غذایی و همچنین حفظ خواص غذایی و حسی آن‌ها هستند [۲۱].

HIUS قابلیت‌های قابل توجهی در کاربردهای مختلف فرآوری شیر دارد. برخی از کاربردهای HIUS در فرآوری شیر عبارت‌اند از همگن سازی، تغییر ویسکوزیته، پاستوریزاسیون، غیرفعال سازی میکروبی و اصلاح ترکیبات زیست فعال.

فناوری HIUS دارای قابلیت شگفت‌انگیزی برای ارائه مزایای قابل توجهی مانند صرفه جویی در انرژی و بهبود خواص در فرآوری لبنیات است. نیاز به تحقیقات بسیار گسترده تر برای بررسی اثرات استفاده از این فناوری نوظهور در زمینه‌های مختلف فرآوری شیر برای استفاده راحت از HIUS به عنوان یک روش جایگزین امیدوارکننده برای فناوری‌های مرسوم است. HIUS بسته به نوع محصول، شرایط فرآوری (نحوه کاربرد، پروب اولتراسوند یا حمام، فرکانس، شدت، قدرت، زمان پردازش و دما)، تأثیرات بسیار متنوعی بر روی فرآیند و خواص محصول نهایی لبنی دارد.

پاستوریزاسیون

پاستوریزاسیون حرارتی یک فرآیند مرسوم برای افزایش ایمنی و ماندگاری شیر است. با این حال، برخی از مسائل در طول پاستوریزه کردن اجتناب ناپذیر است که منجر به تغییرات ناخواسته مانند از دست دادن مواد مغذی ارزشمند، دناتوره شدن پروتئین و غیره در شیر می‌شود [۲۲]. در حال حاضر، دو تکنیک حرارتی اصلی در فرآوری شیر، پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون است [۲۳]. هدف پاستوریزاسیون کاهش باکتری‌های بیماری‌زا و آلاینده‌ها است که باعث می‌شود لبنیات برای مصرف ایمن باشد [۲۴]. فناوری‌های پاستوریزاسیون سنتی حرارتی شامل فرآوری طولانی مدت در دمای پایین (LTLT)، زمان کوتاه در دمای بالا (HTST) و دمای فوق العاده بالا (UHT) هستند که به دلیل کارآمد بودن هنوز هم در این صنعت به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

HIUS در ترکیب با فرآوری حرارتی غیرفعال سازی میکروبی مؤثرتری را حتی در دماهای پایین تر نسبت به سیستم‌های مرسوم ارائه می‌کند که منجر به حفظ ارزش تغذیه‌ای، خواص فیزیکی و شیمیایی شیر می‌شود [۲۵]. بالتازار و همکاران [۲۴] اثر HIUS را بر پروتئین، خواص میکروبیولوژیکی و پروفایل اسید آمینه آزاد شیر نیمه چرب بررسی کردند.

پردازش HIUS در فرکانس‌های پایین (در محدوده ۲۰ kHz) منجر به تولید رادیکال‌های آزاد کمتری می‌شود [۲۷]. از طرف دیگر، اگر از قرار گرفتن در معرض رادیکال‌های ایجادشده توسط کایتاسیون اجتناب شود، هیچ تغییر اکسیداتیو در شیر توسط HIUS ظاهر نمی‌شود. مولکول‌های آب توسط نیروهای کایتاسیون ناشی از HIUS تجزیه می‌شوند و رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیری را تشکیل می‌دهند که واکنش‌های اکسایشی-کاهش‌ی ایجاد می‌کنند. رادیکال‌های آزاد ناشی از اکسیداسیون و هیدرولیز چربی به پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه و چربی آسیب می‌رسانند [۲۲]. بنابراین، فرکانس‌های محدوده ۲۰ kHz مناسب‌ترین فرکانس برای فرآوری شیر است که در آن واکنش‌های نامطلوب منجر به طعم‌های ناخوشایند به حداقل برسد [۲۸].

هموژنیزاسیون (همگن‌سازی)

لیپیدهای موجود در شیر به شکل گلبول‌های چربی شیر هستند که حاوی یک هسته تری گلیسیرید هستند که توسط یک غشای نازک به نام غشای گلبول چربی شیر احاطه شده‌اند. غشاء حاوی لیپیدهای قطبی، کلسترول و پروتئین‌های اختصاصی غشاء است که به عنوان امولسیفایر چربی شیر عمل می‌کند و از گلبول‌های چربی در برابر تخریب و ادغام آنزیمی محافظت می‌کند [۲۹]. در همگن‌سازی، رسیدن به محصولی با ذرات یکنواخت مطلوب است. شیر دارای چربی‌هایی با اندازه ذرات مختلف است. وقتی شیر گرم می‌شود، چربی‌ها به صورت خامه روی سطح شیر قرار می‌گیرند، بنابراین برای جلوگیری از تجمع چربی باید ذرات چربی را شکسته و به اندازه مای کوچک‌تر تبدیل کرد. برای دستیابی به هدف مذکور روش‌های مختلفی مانند هموژنایزر تحت فشار وجود دارد که در آن ذرات در هنگام عبور از یک روزنه در اثر برخورد شکسته می‌شوند. روش دیگر همگن‌سازی مکانیکی است که در آن اختلاط باعث شکستن ذرات می‌شود [۳۰]؛ اما روش دیگر HIUS است [۳۱].

پارامترهای پردازشی شامل توان فراصوت، چگالی انرژی، مدت‌زمان فرآوری و دما مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که HIUS به‌طور قابل‌توجهی آلودگی باکتریایی و همچنین زمان فرآیند HTST را کاهش می‌دهد. ضمناً در نمونه‌های تیمار شده توسط HIUS با توان ۱۰۴ W، مدت‌زمان ۶ دقیقه و چگالی انرژی ۹۳۶ J/mL، مانند شیر فرآوری شده HTST رشد باکتری مشاهده نشد. قدرت بیشتر فراصوت در نمونه‌هایی با حجم برابر منجر به فروپاشی شدید حباب‌های کایتاسیون می‌شود که در نتیجه اثرات مخرب شدیدتری بر باکتری‌ها ایجاد می‌شود که نشان می‌دهد فناوری HIUS به‌اندازه پاستوریزاسیون HTST برای غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها مؤثر است. با توجه به نتایج بالتازار و همکاران [۲۴] HIUS هیچ مشکل تکنولوژیکی یا تغذیه‌ای برای پروتئین‌های شیر ایجاد نکرد. با این وجود، تیمار HIUS پیشنهادی (قدرت ۱۰۴ W، مدت‌زمان ۶ دقیقه و چگالی انرژی ۹۳۶ J/mL) روند پاستوریزاسیون را تا حد زیادی طولانی می‌کند که به‌طور جدی مانع استفاده از روش پیشنهادی در مقیاس بزرگ برای تجاری‌سازی می‌شود. درحالی‌که روش مرسوم HTST فرآیند پاستوریزاسیون را در زمان بسیار کوتاه‌تری کامل می‌کند.

HIUS می‌تواند باعث اکسیداسیون چربی و پروتئین در شیر و تشکیل اجزای فراری شود که برای مصرف‌کننده ناخوشایند است؛ بنابراین، تحقیق در مورد توسعه اجزای طعم در طول پردازش مبتنی بر HIUS باید انجام شود. بوئی و همکاران [۲۶] اثر HIUS را بر روی ۵۰ mL شیر مدل حاوی ۴٪ چربی و ۳/۵٪ پروتئین مطالعه کردند. مقدار کتون‌ها، آلدهیدها، استرها، الکل‌ها و هیدروکربن‌ها با زمان فراصوت‌دهی افزایش یافت. با این حال، آن‌ها تأثیر دما بر تشکیل این ترکیبات را مطالعه نکردند. درحالی‌که در پردازش حرارتی شیر با کمک HIUS مانند پاستوریزه کردن اجزای فرار و طعم‌دهنده یک مسئله حیاتی است.

HIUS عملکرد قابل توجهی را در کاهش اندازه گلبول‌های چربی شیر بر اثر نوسانات فشار، تلاطم و برش نشان می‌دهد [۲۹]. فروپاشی میکرو حباب‌های کاویتاسیون باعث ایجاد نیروهای برشی موضعی و تلاطم می‌شود که گلبول‌های چربی را به اندازه‌های کوچک‌تر می‌شکند [۲۹]. کوه و همکاران [۳۲] گزارش کردند که هموژنایزر معمولی و هموژنایزر فراصوت اندازه ذرات چربی مشابهی را در شیر تولید می‌کنند، اما با استفاده از روش اختلاط برشی در هموژنایزر معمولی، کاهش اندازه ذرات کارایی کمتری دارد. علاوه بر این، نیروهای برشی مکانیکی مسئول کاهش اندازه ذرات چربی هستند. درحالی‌که HIUS به دلیل پدیده کاویتاسیون تأثیر بیشتری بر یکنواختی اندازه ذرات چربی در شیر دارد.

برمودز-آگویر و همکاران [۳۳] عملیات حرارتی همراه با HIUS را بر روی شیر اعمال کردند و ریزساختار گلبول‌های چربی را پس از فرآیند حرارتی بررسی کردند. HIUS با ویژگی‌های ۴۰۰ W، ۲۴ kHz و دامنه ۲۴ μm ، ۱۲۰، با یک پروب ۲۲ mm در دمای ۶۳ °C اعمال شد. آن‌ها دریافتند که گرمایش هم‌زمان برای بهبود عملکرد HIUS در کاهش اندازه گلبول‌های چربی مورد نیاز است.

فشار موضعی ایجاد شده در محدوده ۱۰۰ MPa به دلیل فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون کارآمدتر از روش معمول همگن‌سازی است که در فشارهای پایین‌تر در محدوده ۲۰ تا ۵۰ MPa عمل می‌کند. در شکل ۳، گلبول‌های چربی فراصوت‌دهی شده در دمای ۶۳ °C نشان شده است.

لیو و همکاران [۲۹] دریافتند که HIUS در مقایسه با فرآیند همگن‌سازی مرسوم به‌طور یکسان اندازه گلبول‌های چربی شیر را کاهش می‌دهد، اما منجر به آسیب کمتری به پروتئین‌های غشای گلبول چربی شیر می‌شود. اگرچه HIUS توانایی خوبی در همگن‌سازی شیر نشان داده است، اما ممکن است طعم شیر را به دلیل فشارهای موضعی و دماهای موضعی بسیار زیاد ایجاد شده توسط حباب‌های کاویتاسیون در حال فروپاشی تغییر دهد. با این حال، آن‌ها ثابت کردند که HIUS ممکن است یک فناوری مطلوب برای همگن‌سازی شیر باشد، اما آن‌ها تحقیقات بیشتری را در مورد بهینه‌سازی و افزایش مقیاس این فناوری برای درک چالش‌های موجود پیشنهاد کردند.

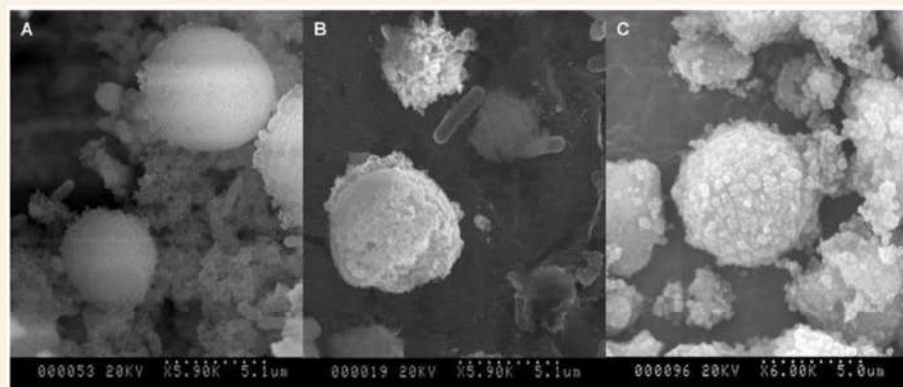
فیلتراسیون

غشاء و فرایندهای غشایی به دلیل مصرف انرژی کمتر نسبت به سایر روش‌های جداسازی مرسوم به‌طور

شکل ۳

ریزساختار گلبول‌های چربی در شیر، A
حرارتی در ۶۳ °C، B
دقیقه ۱۰
دقیقه ۳۰
ترموسونیکاسیون در ۶۳ °C

[۳۳].



حباب‌های کاویتاسیون است که منجر به تنش برشی با مشخصات سرعت دینامیکی می‌شود که ذرات رسوب شده روی غشاء را در حین ریزش جاروب می‌کند. میکروجت‌ها جت‌های سیالی هستند که در سرعت‌های بالا (۱۰۰ تا ۲۰۰ m/s) به دلیل فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون پرتاب می‌شوند که اجازه می‌دهد مواد جامد رسوب کرده روی سطح غشاء تمیز شوند [۳۵].

میرزایی و محمدی [۳۷] دریافتند که HIUS بر شار شیر مؤثر است و ضریب افزایش شار ۲۱۷٪ در فشار خوراک ۰/۸ bar به دست آمد، درحالی‌که هیچ اثر نامطلوبی بر یکپارچگی غشا نداشت. افزایش توان HIUS از ۲۰ W به ۴۰ W، منجر به افزایش ضریب افزایش شار از ۲۲۸٪ درصد به ۴۹۰٪ شد که به دلیل دامنه بیشتر HIUS و کاویتاسیون شدیدتر بود. این پدیده به دلیل کاهش اندازه ذرات و انسداد غشا است. بالین‌حال، اثر دقیق توان فراصوت بر اولترافیلتراسیون شیر نیاز به بررسی بیشتر دارد. علاوه بر این، باید توجه داشت که توان‌های بالاتر بسته به شرایط فرآیند و غشاء می‌توانند بر ساختار غشا تأثیر بگذارند. هنگامی‌که غشاء دور از ناحیه کاویتاسیون قرار می‌گیرد، فقط جریان صوتی می‌تواند بر حذف ذرات تأثیر بگذارد و حباب‌های کاویتاسیون قبل از رسیدن به سطح غشاء در خوراک فرومی‌ریزند. همچنین حالت پیوسته HIUS به جای حالت پالسی برافزایش شار تأثیر بیشتری داشت.

قدرت‌های شدید HIUS می‌تواند به غشاء آسیب برساند. از طرف دیگر افزایش سرعت جریان متقاطع باعث کاهش آسیب بر روی سطوح غشا می‌شود. بالین‌حال، اثر مضاعف HIUS و سرعت جریان متقاطع نباید تنها روی افزایش شار و/یا کاهش آسیب سطح غشاء در نظر گرفته شود. همچنین بررسی اثرات آن‌ها بر روی ماکرومولکول‌های خاص، مانند دنا توره شدن پروتئین‌ها در طی فیلتراسیون شیر، بسیار مهم است [۳۵].

مزایای فناوری غشاء عبارت‌اند از: عملکرد آسان، طراحی فشرده و مدولار، انرژی ورودی کمتر و شرایط فرآوری ملایم [۳۴]. بالین‌حال، محدودیت اصلی برای استفاده گسترده از فناوری غشاء در صنایع غذایی، کاهش شار نفوذ به دلیل رسوب است. رسوب‌گیری مشکل اصلی محدودکننده در فرآیندهای غشایی است که شار نفوذ را کاهش می‌دهد.

تکنیک‌های سنتی برای به حداقل رساندن رسوب-گیری، اصلاح سطح غشاء و دستکاری جریان با کنترل شرایط هیدرودینامیکی است. درحالی‌که این روش‌ها مشکل را به طور کامل حل نمی‌کنند [۳۵]. اخیراً، مازول‌های ارتعاشی پیشنهاد شده‌اند که نرخ‌های برشی بالاتری تولید می‌کنند و آشفتگی را در سطح غشاء افزایش می‌دهند و باعث افزایش انتشار مجدد ذرات در محلول توده‌ای می‌شوند. فیلتراسیون غشایی به کمک HIUS توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است. HIUS عملکرد فیلتراسیون را با شکستن لایه کیک در سطح غشاء و افزایش شار بهبود می‌بخشد. HIUS قادر است نیروی هیدرودینامیکی سیالات و متعاقباً شار را افزایش دهد که ممکن است به دلیل افزایش انتقال جرم به دلیل تلاطم بالاتر به جای اثر فراصوت باشد [۳۵]. فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون باعث حذف لایه‌های رسوب‌کننده از سطح غشاء توسط نیروهای تلاطم و برشی می‌شود که می‌تواند بر نیروهای جاذبه بین لایه کیک و سطح غشاء غلبه کند. مکانیسم‌های پیشنهادی برای توضیح اثر HIUS بر رسوب غشایی عبارت‌اند از: جریان صوتی، میکرواستریم، میکروجریان و میکروجت. جریان صوتی به مایع اجازه می‌دهد تا ذرات را با فلوانفعالات ضعیف‌تر با سطح غشا جارو کند. میکرواستریم‌ها حباب‌هایی هستند که در هنگام برخورد با حباب‌های دیگر با ادغام انتشار می‌یابند و رشد می‌کنند و وقتی به سطح آلوده می‌رسند، ذرات رسوب‌شده روی غشاء را می‌کشند و نوعی حباب با اندازه فزاینده تولید می‌کنند [۳۶]. میکروجریان حرکت سیال در جهات مختلف ناشی از سیکل فشرده‌سازی-اتساع یکسان

نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیقات انجام‌شده در مورد تأثیر فراصوت بر فرآوری و کیفیت نهایی محصول و با پیشرفت این فناوری، به‌کارگیری فراصوت در فرآوری محصولات غذایی به‌صورت تجاری در آینده نزدیک اتفاق خواهد افتاد. در حال حاضر، در مقیاس‌های صنعتی محدودیت‌هایی برای این فرآیند وجود دارد و تلاش می‌شود تا با غلبه بر آن‌ها، دامنه کاربرد فراصوت افزایش پیدا کند. تحقیقات امروزی در مقیاس آزمایشگاهی انجام می‌شود، بنابراین مطلوب است که با صنعتی شدن این فناوری گامی در جهت افزایش وسعت دامنه کار و تلاش برای تجاری‌سازی آن برداشته شود. با این حال، گفته می‌شود که این فناوری از نظر اقتصادی امکان‌پذیر است، اما کمبود دانش برای توسعه سیستم‌های مبتنی بر HIUS در مقیاس کامل وجود دارد. از سوی دیگر، مقیاس‌پذیری فرآیندهای فراصوتی با استفاده از راکتورهای فراصوت در مقیاس بزرگ، سونوترودها و میدل‌های اولتراسونیک همچنان یک چالش برای کاربردهای صنعتی است؛ بنابراین، مطالعات بیشتری باید در مورد افزایش مقیاس سیستم‌های پیوسته به کمک HIUS و فرآیندهای مرتبط در فرآوری محصولات غذایی انجام شود.

منابع

- [1] M. Gallo, L. Ferrara, D. Naviglio, *Foods* **2018**, 7, 164.
- [2] Z. J. Dolatowski, J. Stadnik, D. Stasiak, *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* **2007**, 6, 88.
- [3] P. Cui, X. Yang, Q. Liang, S. Huang, F. Lu, J. Owusu, X. Ren, H. Ma, *Ultrason. Sonochem.* **2020**, 62, 104859.
- [4] L. M. Carrillo-Lopez, I. A. Garcia-Galicia, J. M. Tirado-Gallegos, R. Sanchez-Vega, M. Huerta-Jimenez, M. Ashokkumar, A. D. Alarcon-Rojo, *Ultrason. Sonochem.* **2021**, 73, 105467.
- [5] I. Lavilla, C. Bendicho, in *Water Extr. Bioact. Compd.*, Elsevier, **2017**, pp. 291–316.
- [6] F. Chemat, N. Rombaut, A.-G. Sicaire, A. Meullemiestre, A.-S. Fabiano-Tixier, M. Abert-Vian, *Ultrason. Sonochem.* **2017**, 34, 540.
- [7] S. V. Sancheti, P. R. Gogate, *Ultrason. Sonochem.* **2017**, 36, 527.
- [8] S. Shokri, F. Javanmardi, M. Mohammadi, A. Mousavi Khaneghah, *Ultrason. Sonochem.* **2022**, 83, 105938.
- [9] B. Xu, S. M. R. Azam, M. Feng, B. Wu, W. Yan, C. Zhou, H. Ma, *Ultrason. Sonochem.* **2021**, 81, 105855.
- [10] D. Pingret, A. S. Fabiano-Tixier, F. Chemat, *Accelerated Methods for Sample Preparation in Food*, Elsevier, **2012**.
- [11] N. Bhargava, R. S. Mor, K. Kumar, V. S. Sharanagat, *Ultrason. Sonochem.* **2021**, 70, 105293.
- [12] G. Chatel, L. Novikova, S. Petit, *Appl. Clay Sci.* **2016**, 119, 193.
- [13] M. Zhang, N. Haili, Q. Chen, X. Xia, B. Kong, *Meat Sci.* **2018**, 136, 1.
- [14] Q. Sun, X. Zhao, C. Zhang, X. Xia, F. Sun, B. Kong, *LWT* **2019**, 108, 106.
- [15] A. D. Alarcon-Rojo, L. M. Carrillo-Lopez, R. Reyes-Villagrana, M. Huerta-Jiménez, I. A. Garcia-Galicia, *Ultrason. Sonochem.* **2019**, 55, 369.
- [16] M. R. Kasaai, *Nat. Sci.* **2013**, 05, 14.
- [17] N. S. Deora, N. N. Misra, A. Deswal, H. N. Mishra, P. J. Cullen, B. K. Tiwari, *Food Eng. Rev.* **2013**, 5, 36.
- [18] C. Gambuteanu, P. Alexe, *J. Food Sci. Technol.* **2015**, 52, 2130.



- [19] L. Jaiswal, M. Worku, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2022**, 62, 7503.
- [20] D. Wang, J. Fritsch, C. I. Moraru, *J. Dairy Sci.* **2019**, 102, 8798.
- [21] A. Mohamad, N. N. A. K. Shah, A. Sulaiman, N. Mohd Adzahan, R. M. Aadil, *J. Food Process. Preserv.* **2020**, 44, DOI 10.1111/jfpp.14940.
- [22] R. K. Abrahamsen, J. A. Narvhus, *Int. Dairy J.* **2022**, 131, 105375.
- [23] L. Nunes, G. M. Tavares, *Trends Food Sci. Technol.* **2019**, 90, 88.
- [24] C. F. Balthazar, A. Santillo, J. T. Guimarães, A. Bevilacqua, M. R. Corbo, M. Caroprese, R. Marino, E. A. Esmerino, M. C. Silva, R. S. L. Raices, M. Q. Freitas, A. G. Cruz, M. Albenzio, *Ultrason. Sonochem.* **2019**, 51, 241.
- [25] O. O. Alegbeleye, J. T. Guimarães, A. G. Cruz, A. S. Sant'Ana, *Trends Food Sci. Technol.* **2018**, 82, 148.
- [26] A. T. H. Bui, D. Cozzolino, B. Zisu, J. Chandrapala, *LWT* **2021**, 147, 111677.
- [27] P. Juliano, A. E. Torkamani, T. Leong, V. Kolb, P. Watkins, S. Ajlouni, T. K. Singh, *Ultrason. Sonochem.* **2014**, 21, 2165.
- [28] V. Akdeniz, A. S. Akalin, *Trends Food Sci. Technol.* **2019**, 86, 392.
- [29] Y. Liu, S. Boeren, L. Zhang, P. Zhou, K. Hettinga, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2021**, 70, 102703.

[30] D. J. McClements, E. Newman, I. F. McClements, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2019**, 18, 2047.

[31] S. A. Bredikhin, V. N. Andreev, A. N. Martekha, E. A. Soldusova, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2022**, 954, 012014.

[32] L. L. A. Koh, J. Chandrapala, B. Zisu, G. J. O. Martin, S. E. Kentish, M. Ashokkumar, *Food Bioprocess Technol.* **2014**, 7, 556.

[33] D. Bermúdez-Aguirre, R. Mawson, G. V. Barbosa-Cánovas, *J. Food Sci.* **2008**, 73, E325.

[34] K. Nath, H. K. Dave, T. M. Patel, *Trends Food Sci. Technol.* **2018**, 73, 12.

[35] K. K. Dey, X. Zhao, B. M. Tansi, W. J. Méndez-Ortiz, U. M. Córdova-Figueroa, R. Golestanian, A. Sen, *Nano Lett.* **2015**, 15, 8311.

[36] M. LAMMINEN, *J. Memb. Sci.* **2004**, 237, 213.

[37] A. Mirzaie, T. Mohammadi, *J. Food Eng.* **2012**, 108, 77.

