

مروری بر راهکارهای مبتنی بر نانوفناوری برای افزایش کیفیت فرآورده‌های لبنی

فریبا شفیعی؛ نرگس نیکوفرد*؛ حسین نیکوفرد

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده

قرار گرفتن در معرض آلودگی با طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌های فاسدکننده باعث تلفات قابل توجه محصولات لبنی می‌شود. همچنین افزایش کیفیت و بهبود طعم محصولات لبنی از مسائل مورد توجه در جامعه و صنعت می‌باشد. روش‌های حرارتی شامل پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون کارایی بالایی در غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌های فاسدکننده دارند ولی در بعضی موارد باعث تغییر رنگ، طعم و از دست رفتن مواد مغذی می‌شوند. به علاوه، راهکارهایی در برابر آلودگی مجدد محصولات لبنی مورد نیاز است. برای حل یا کاهش این مشکلات، نانوفناوری روش‌های جایگزین یا مکملی را در سال‌های اخیر ارائه داده است. در این مقاله، مروری بر فناوری‌های غیرحرارتی مانند پلاسمای سرد و نانوحباب و کاربردهای آن‌ها در زمینه مواد لبنی صورت می‌گیرد. فناوری‌های غیرحرارتی، فرآوری شیر را در زمان کوتاه و دمایی پایین انجام می‌دهند. از این نظر، حداقل تغییر یا عدم تغییر در طعم و مواد مغذی ضروری ایجاد می‌کنند. استفاده از بسته‌بندی‌های فعال با نانوساختارهای ضدباکتری برای جلوگیری از آلودگی ثانویه و رشد باکتری‌ها مورد توجه است. در مقاله حاضر، مروری بر خواص ضدباکتری نانوذرات نقره و اکسید روی در غیرفعال کردن میکروب‌ها می‌شود. سپس، استفاده از آنها در بسته‌بندی در مقیاس پژوهشی و صنعتی برای افزایش عمر محصولات لبنی مورد توجه قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: محصولات لبنی، پلاسمای سرد، نانوحباب، بسته‌بندی فعال، نانوساختارهای ضد باکتری.

ایمیل نویسنده مسئول: nikoofard@kashanu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۳۱

فصلنامه

ISC

انجمن نانو

فناوری

ایران

۱ مقدمه

مشکلات باشد. در این مقاله، مروری بر روش‌های غیرحرارتی همچون فناوری‌های پلاسمای سرد و نانوحباب و استفاده از بسته‌بندی‌های فعال با نانوساختارهای ضدباکتری مانند نانوذرات نقره و اکسید روی می‌شود. در هر مورد، ابتدا فرآیندهای ضد میکروبی توضیح داده شده و سپس کاربردهای مختلف آن‌ها به ویژه در برخی فرآورده‌های لبنی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بسته‌بندی مواد غذایی به دلیل آگاهی مصرف‌کنندگان و نگرانی‌های ایمنی به طور مداوم در حال تغییر است. اگرچه میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا در محصولات لبنی اغلب در اثر پاستوریزه کردن از بین می‌روند، اما پاستوریزاسیون ناکافی و آلودگی مجدد محصولات در طی فرآوری پس از پاستوریزه شدن گزارش شده است. از این نظر، استفاده از فناوری‌های نوآورانه و نوظهور می‌تواند جایگزین جالب توجهی برای مقابله با این

۲- فناوری پلاسما سرد

الکترودها، ممکن است در برخی موارد ولتاژهای نسبتاً بالایی (۱۰ کیلو ولت) برای احتراق مورد نیاز باشد. در چنین مواردی لازم است اقدامات مهمی مانند ایزوله کردن^۴ انجام شود (۷). تخلیه سد دی‌الکتریک برای سطوح بزرگ ایده‌آل است (۴).

تخلیه کرونا شکل ۱ ج در نزدیکی الکترودهای بزرگ و تحت فشار اتمسفر مشاهده می‌شود. میدان-الکتریکی به اندازه‌ای بزرگ است که یونیزاسیون اتم‌ها یا مولکول‌های گاز اطراف الکترون‌ها به سرعت انجام می‌شود. هندسه استوانه‌ای یا الکترودهای تیز، خمیده و یا الکترودهای تخت معمولاً در تخلیه کرونا استفاده می‌شوند. تولید با دستگاه‌های ساده با سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های عملیاتی بسیار کم، مزیت مهم این روش به نظر می‌رسد.

همچنین در تخلیه ریزموج شکل ۱د برخلاف جت پلاسما، تخلیه سد دی‌الکتریک و تخلیه کرونا بدون الکترودها انجام می‌شوند. امواج ریزموج تولید شده توسط ژنراتور از طریق یک موجبر یا کابل هم-محور^۵ به محفظه فرآیند هدایت می‌شوند. الکترون‌های موجود در گاز، این امواج ریزموج را جذب می‌کنند که منجر به یونیزه شدن می‌گردد. بزرگترین مزیت تخلیه ریزموج این است که می‌توان آن را بدون نصب الکترودها در هوا یا حتی با بخار آب مشتعل کرد. علاوه بر این، مصرف گاز آن متوسط بوده و بسته به گاز تخلیه مورد استفاده، می‌تواند گونه‌های واکنش‌پذیر زیادی تولید کند. با این حال، دشواری کاربرد آن در مناطق بزرگ، از معایب تخلیه ریزموج است [۷].

پلاسما با تبدیل یک گاز به گاز یونیزه حاوی اتم‌ها، یون‌ها و الکترون‌ها با تأمین انرژی کافی به دست می‌آید. پلاسما را می‌توان در هر گاز خنثی با تأمین انرژی کافی که قادر به ایجاد یونیزه کردن گاز باشد القا کرد (۱). با توجه به دما، می‌توان پلاسما را به دو روش پلاسما گرم و سرد تهیه کرد (۲،۳). فشار بالا و انرژی بسیار بالا برای بدست آوردن پلاسما گرم مورد نیاز است. اما پلاسما سرد در دمای ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود و به مصرف انرژی کمتری در مقایسه با پلاسما گرم نیاز دارد (۴، ۵). پلاسما سرد به روش‌های متعددی مانند جت‌های پلاسما، تخلیه سد دی‌الکتریک، تخلیه کرونا^۲ و تخلیه ریزموج تولید می‌شود (۶) (شکل ۱).

با توجه به شکل ۱ الف جت‌های پلاسما اغلب از دو رسانا (الکترودها سوزنی و الکترودها حلقوی) تشکیل شده‌اند، اما پیکربندی‌های تکررسانا مانند الکترودها سوزنی نیز وجود دارد و شعله‌های کوچکی از پلاسما^۱ را در محدوده فرکانس رادیویی تولید می‌کنند. شکاف الکترودها (فاصله بین الکترودها) معمولاً چند میلی‌متر است و گاز فرآیند (معمولاً گازهای نجیب) با ولتاژهای تقریباً ۱۰۰ ولت مشتعل می‌شود. بزرگترین مزیت جت‌های پلاسما اندازه کوچک آن‌ها و توانایی نفوذ به فضاهای باریک است.

در تخلیه سد دی‌الکتریک شکل ۱ ب، پلاسما بین دو الکترودهای تولید می‌شود که توسط یک ماده نارسانا (دی‌الکتریک) از هم جدا شده‌اند. در این سیستم گاز استفاده شده و فاصله بین الکترودها از پارامترهای مهم فرآیند هستند. از مهمترین مزایای تخلیه سد دی‌الکتریک این است که می‌توان از گازهای مختلف زیادی برای به دست آوردن این نوع پلاسما استفاده کرد، جریان گاز نسبتاً کمی مورد نیاز است، تخلیه همگن را می‌توان برای چندین متر مشتعل کرد و می‌توان آن را با هندسه‌های مختلف الکترودها مطابقت داد. با این حال، بسته به فاصله بین

⁴ isolation

⁵ coaxial cable

¹ plasma jets

² corona discharge

³ plasma flames

۲-۱ اثرات پلاسمای سرد بر شیر و فرآورده‌های لبنی

اثر بخشی پلاسمای سرد اساساً مبتنی بر تولید پرتوهای فرابنفش، گونه‌های اکسیژن فعال^۶ (ازون، پراکسید هیدروژن، اکسیژن منفرد، رادیکال‌های پراکسیل و هیدروکسیل و غیره) و گونه‌های نیتروژن فعال (اکسید نیتریک، پراکسی نیتريت، اسید پراکسی نیتروس^۷ و غیره) (۷، ۸). این گونه‌های واکنشی تشکیل شده باعث تغییرات فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژی مهمی در شیر و محصولات لبنی می‌شوند. یکی از مهم‌ترین تغییرات، تغییر شکل سطح سلول میکروبی، آسیب به ماده ژنتیکی درون سلولی و در نهایت مرگ سلول در اثر پارگی غشای سلولی (لیز^۸) است (۹). همچنین رادیکال‌های آزاد موجود در پلاسما، پتانسیل غیرفعال کردن آنزیم‌ها را دارند (۱۰).

این رادیکال‌های آزاد از طریق واکنش‌های شیمیایی مانند اکسیداسیون، سولفوناسیون و هیدروکسیلاسیون باعث تغییراتی در اسیدهای آمینه می‌شوند. گزارش شده است که پلاسمای سرد به طور خاص، ساختار دوم آنزیم‌ها (α -helix و β -sheet) را هدف قرار می‌دهد (۱۱). علاوه بر این روداکا و همکاران نیز گزارش داده‌اند که بیشترین تأثیر بر غیرفعال‌سازی آنزیم در حضور گونه‌های اکسیژن فعال مشاهده شده است (۱۲). در جدول ۱ تعداد محدودی از مطالعاتی که به بررسی اثرات کاربرد پلاسمای سرد بر خواص فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژی شیر و محصولات لبنی پرداخته‌اند، گزارش شده است.

اکثر این مطالعات در مورد مهار شایع‌ترین عوامل بیماری‌زا در شیر و محصولات لبنی است. پلاسمای سرد به طور قابل توجهی می‌تواند تعداد عوامل بیماری‌زا مانند اشرشیاکلی^۹ (۱۳)، استافیلوکوکوس اورئوس (۱۴)، لیستریا مونوسیتوزنز^{۱۰}، سالمونلا تیفی^{۱۱} موریوم (۱۵)،

لیستریا اینوکوا^{۱۲} (۱۶) و کرونوباکتر ساکزاکی^{۱۳} (۱۷) را در محصولاتی مانند شیر، پنیر، شیرخشک و نوشیدنی‌ها، بسته به روش اعمال شده، نوع گاز مصرفی و زمان استفاده، کاهش دهد. استفاده از پلاسمای سرد (تخلیه سد دی‌الکتريک) به مدت ۵ و ۱۰ دقیقه در شیر کامل، مقادیر pH را بدون تغییر عمده در اکسیداسیون لیپید کاهش می‌دهد (۱۳). همچنین مشاهده شده که استفاده از پلاسمای سرد در شیر خام، به عنوان یک منبع اکسیژن فعال عمل کرده و می‌تواند منجر به اکسیداسیون مولکول‌ها و تولید آلدئید شود. استفاده از پلاسمای سرد (تخلیه سد دی‌الکتريک) برای زمان‌های مختلف (۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵ دقیقه) باعث افزایش محتوای آلدئید کل پس از ۲۰ دقیقه می‌شود [۱۹]. افزایش آلدئید با استفاده از پلاسما باعث بهبود خواص و ویژگی‌های محصولات می‌شود. همچنین می‌تواند به کاهش آلودگی میکروبی و بهبود استانداردهای بهداشتی محصولات کمک کند. سطح این میکروارگانیسم‌ها بر روی پنیر چدار تکه تکه شده در پاسخ به درمان پلاسما ۱۰ دقیقه‌ای به ترتیب، کاهش ۳/۲، ۲/۱ و ۵/۸ Log CFU/g نشان داده است. هر چند مقدار pH کاهش یافته اما مواد معرف آلدئید (اسید تیوباربیئوریک) با قرار گرفتن طولانی مدت پنیر چدار برش داده شده تحت پلاسما به طور قابل توجهی افزایش یافت (۱۵).

⁶ Reactive oxygen species: ROS

⁷ peroxyntrous acid

⁸ lysis

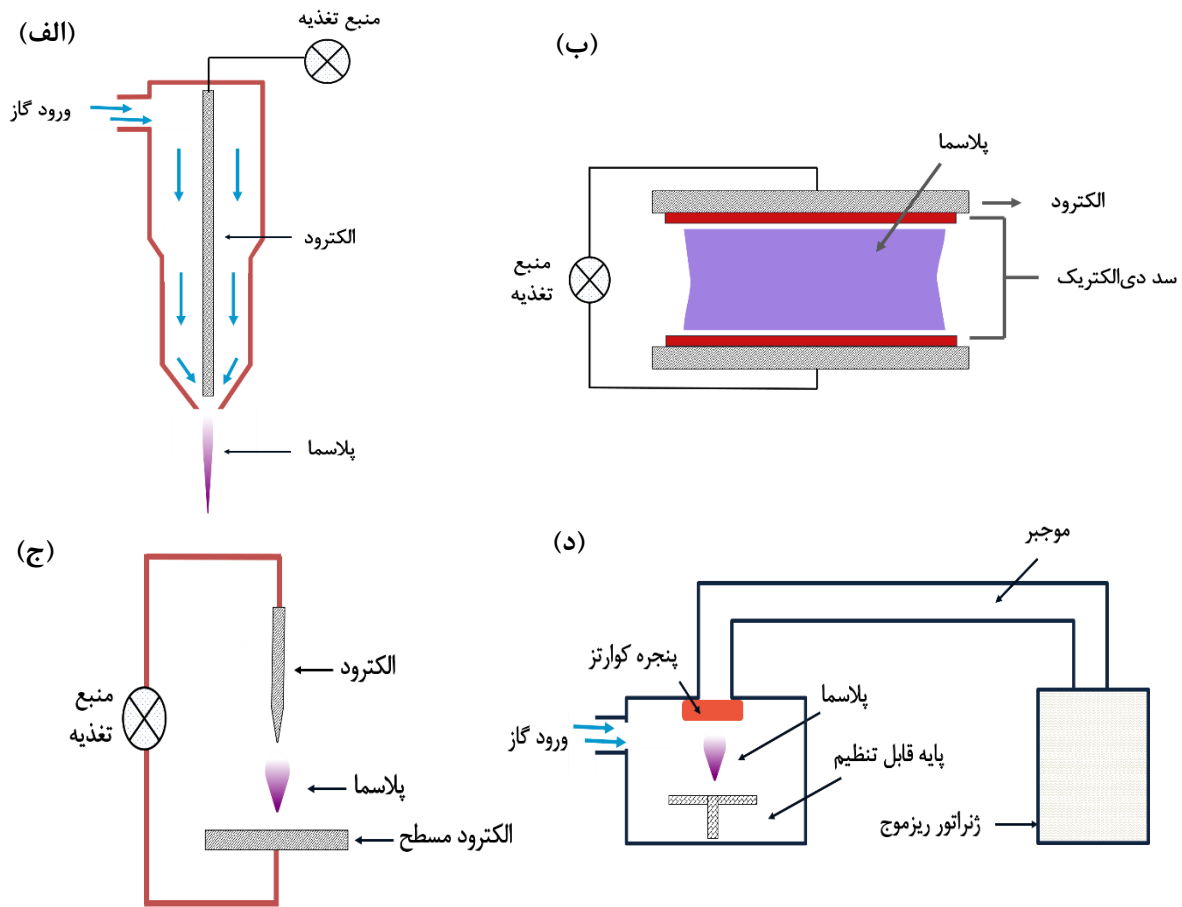
⁹ E-coli

¹⁰ Listeria monocytogenes

¹¹ Salmonella Typhimurium

¹² Listeria innocua

¹³ Cronobacter sakazakii



شکل ۱. سامانه‌های مختلف پلاسمای سرد: (الف) جت پلازما، (ب) تخلیه سد دی الکتریک، (ج) تخلیه کرونا و (د) تخلیه

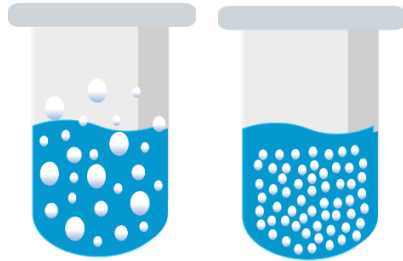
ریز موج.

مورد استفاده در تولید پلازما، ولتاژ و زمان اعمال شده. بنابراین به دست آوردن نتایج مختلف در مطالعات، ارتباط تنگاتنگی با روش به دست آوردن پلاسمای اعمال شده، پارامترهای فرآیند و همچنین گونه‌های میکروارگانیزم مورد بررسی دارد. در نتیجه، هنوز مطالعات بیشتری برای مشخص شدن تغییرات شیر و محصولات لبنی ناشی از کاربرد پلاسمای سرد مورد نیاز است.

در مجموع، فناوری پلاسمای سرد که یکی از جدیدترین فناوری‌های غیرحرارتی به شمار می‌رود، برای شیر و فرآورده‌های لبنی در مقایسه با روش‌های حرارتی مزایای قابل توجهی دارد. با این حال، مطالعات در مورد این موضوع، به طور کلی بر روی اثر ضد میکروبی پلاسمای سرد متمرکز شده است و تغییرات در خواص فیزیکی، شیمیایی و حسی محصول نهایی تا به امروز به

در مطالعه دیگری، هنگامی که چربی شیر با پلاسمای سرد (تخلیه سد دی الکتریک) به مدت ۳-۳۰ دقیقه تحت درمان قرار گرفت، مشاهده شد که محصولات اکسیداسیون ثانویه در نمونه‌ها تنها بعد از ۳۰ دقیقه آزاد شدند. آزاد شدن محصولات اکسیداسیون، منجر به کاهش نامطلوب بعضی از اسیدهای چرب شیر می‌شوند (۱۸). همچنین پلاسمای سرد اثرات متفاوتی بر خواص حسی شیر و محصولات لبنی دارد. از یک طرف، بر طعم، بو و پذیرش کلی پنیر تأثیر منفی می‌گذارد (۱۴). از طرف دیگر، برخی از محققان گزارش کرده‌اند که هیچ تغییر قابل توجهی در پارامترهای رنگ در نمونه‌های شیر حاوی مقادیر مختلف چربی رخ نمی‌دهد (۱۹). نوع و غلظت گونه‌های واکنش‌پذیری که در پلازما یافت می‌شوند بسته به عوامل زیاد موثر متفاوت است؛ مانند گاز یا مخلوط گازی که پلازما در آن القا می‌شود، پیکربندی منبع

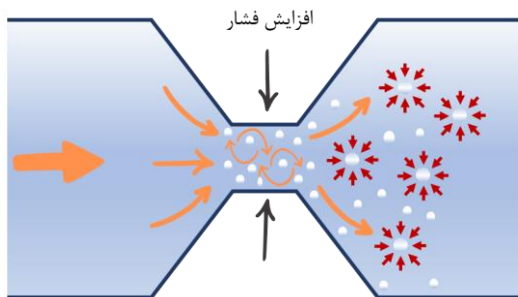
به دلیل مقیاس‌پذیر بودن و سادگی کاربرد تجاری و صنعتی دارد (۲۴).



شکل ۲. تصویری از پایداری نانوحباب‌ها و ناپایداری میکروحباب‌ها در داخل سیال. الف) میکروحباب، ب) نانوحباب.

۳-۱- بررسی تاثیر نانوحباب بر فرآورده‌های لبنی

یکی از کم‌هزینه‌ترین راه‌ها برای تولید نانوحباب‌ها، کایتاسیون هیدرودینامیکی است که مزایایی مانند تجهیزات ساده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری پایین دارد. این فناوری غیرحرارتی برای پاستوریزه و استریل کردن غذاهای مایع پیشنهاد شده است، زیرا پتانسیل تخریب میکروب‌ها و کاهش فعالیت آنزیم‌ها را دارد. در عین حال، خواص تغذیه‌ای و فیزیکیوشیمیایی ضروری را حفظ می‌کند. در این روش اغلب از ژنراتور نوع ونتوری به دلیل ساده بودن ساخت در مقیاس بزرگ، استفاده می‌شود. ونتوری سیستمی است برای سرعت بخشیدن به جریان سیال، که با فشردن آن در یک لوله مخروطی شکل ایجاد می‌شود (شکل ۳). سیال در این بخش سرعت خود را افزایش و فشار خود را کاهش داده و خلاء جزئی ایجاد می‌کند.



شکل ۳. اثر ونتوری.

هنگامی که تبخیر به دلیل افت فشار و با حرکت سیال اتفاق می‌افتد، حباب ایجاد می‌شود. فشار داخلی در

اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است. نتایج مطالعات -که برخی از آن‌ها در اینجا خلاصه شده است- نشان می‌دهد که پلاسمای سرد اثرات متفاوتی بر خواص میکروبیولوژی، فیزیکیوشیمیایی، بیوشیمیایی و حسی شیر و فرآورده‌های لبنی دارد.

۳- نانوحباب

نانوحباب‌ها یکی از کوچکترین اندازه‌های حباب شناخته شده هستند که تقریباً ۲۵۰۰ برابر کوچکتر از یک دانه نمک یا کمتر از ۲۰۰ نانومتر قطر دارند. هیچ تعریف ثابتی برای نانوحباب‌ها وجود ندارد، این اصطلاح دائماً در حال تغییر است، اما برخی از پژوهشگران آنها را به عنوان حباب‌های فوق‌العاده با محدوده قطر ۱-۱۰۰۰ نانومتر تعریف کردند. نانوحباب‌ها به‌طور خنثی شناور شده و می‌توانند برای هفته‌ها در مایع (معمولاً آب) معلق باقی بمانند، بدون اینکه به سطح برسند و از گاز خارج شوند (شکل ۲). علت پایداری نانوحباب‌ها در مایع این است که کشش سطحی حباب، فشار داخلی و فشار خارجی و بار سطحی حباب و محیط به تعادل رسیده‌اند. نانوحباب‌ها در حوزه‌های مختلف برای دستیابی به نتایج بهتر استفاده می‌شوند به عنوان مثال نانوحباب‌های هوا و اکسیژن برای رشد گیاه (۲۰)، نانوحباب‌های هیدروژن برای تهیه دارو و سوخت با کارایی بالا (۲۱)، به منظور تمیز کردن سطح (۲۲) و نانوحباب‌های ازن برای از بین بردن باکتری‌های دندان (۲۳).

کایتاسیون (نانوحباب) به چهار نوع طبقه‌بندی می‌شود: i) کایتاسیون آکوستیک (امواج صوتی)، ii) کایتاسیون هیدرودینامیکی، iii) کایتاسیون نوری و IV) کایتاسیون ذرات (مثلاً پروتون). فناوری کایتاسیون نوری و ذرات در مقیاس آزمایشگاهی برای مطالعات اساسی کایتاسیون مانند دینامیک حباب استفاده می‌شود. فناوری کایتاسیون نوری و ذرات در مقیاس آزمایشگاهی برای مطالعات اساسی کایتاسیون مانند دینامیک حباب استفاده می‌شود. از سوی دیگر، کایتاسیون آکوستیک و هیدرودینامیکی، به دلیل سهولت کار و توانایی ایجاد شدت‌های کایتاسیون مورد نیاز، به‌طور گسترده در دانشگاه و صنعت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. کایتاسیون هیدرودینامیکی

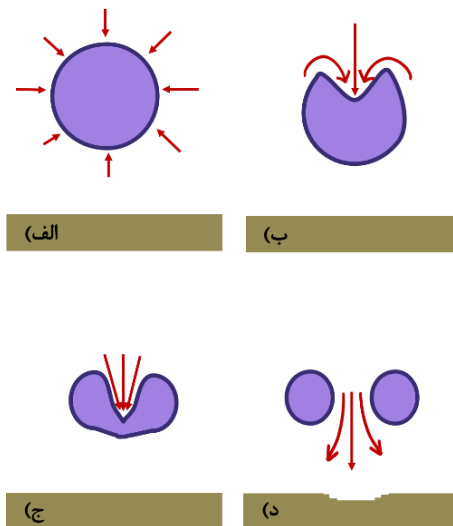
در دقیقه سطح عوامل بیماری‌زای موجود همچون اشرشیاکلی، استافیلوکوکوس اورئوس و باسیلوس سرئوس به ترتیب در دمای نهایی ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک تا دو ثانیه به ترتیب ۵/۸۹، ۵/۵۳، و ۰/۰۸ ± ۲/۹۹ کاهش \log نشان می‌دهد. علاوه بر این، اثر مخرب کاویتاسیون هیدرودینامیکی بر ترکیبات تغذیه‌ای شیر شامل مواد معدنی، چربی، پروتئین و ویتامین‌ها در دمای بالا در این مطالعه مشاهده می‌شود (۲۶).

کاویتاسیون آکوستیک بسته به شدت کم یا زیاد بودن امواج اولتراسوند، اثرات مختلفی بر روی محصولات لبنی ایجاد می‌کند. امواج کم شدت برای کنترل کیفیت محصولات لبنی و تشخیص تغییرات فیزیکی-شیمیایی در حین نگهداری و انجام فرآیند بر روی محصولات لبنی استفاده می‌شود. امواج با شدت بالا تغییرات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی را از طریق پدیده‌های کاویتاسیون ایجاد می‌کنند و برای کاربردهایی همچون خامه‌سازی، پاستوریزاسیون، همگن‌سازی، کاهش حساسیت‌زایی پروتئین‌های شیر، کاهش ویسکوزیته یا استخراج پنیر استفاده می‌شود (۲۷). مطالعات نشان داده‌اند که قدرت اولتراسوند می‌تواند فرآیند تخمیر باکتری‌های اسید لاکتیک را با اصلاح فعالیت متابولیک آنها افزایش و در عین حال زمان تخمیر را کاهش دهد و لذا ویژگی‌های کیفی محصولات شیر تخمیر شده را بهبود بخشد.

تخمیر یکی از مراحل مهم در فرآوری محصولات لبنی است، اما در فرآیند تولید نیز یکی از زمان‌برترین مراحل است. بنابراین، مزایای فراصوت برای فرآیند تخمیر به دلیل فعال شدن میکروبی اهمیت زیادی پیدا می‌کند. در واقع، کاربردهای اولتراسوند اثر دوگانه بر روی میکروارگانیسم‌ها دارند. علاوه بر استفاده برای غیرفعال‌سازی میکروبی در صنایع لبنی، می‌تواند برای فعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها نیز بسته به قدرت و فرکانس اولتراسوند، زمان فراصوت، نوع میکروارگانیسم، pH و دما استفاده شود (۲۸).

در مطالعه آکدنیز و همکاران نیز به بررسی و مطالعه کاربردهای عمده و مزایای مهم اولتراسوند با شدت بالا در تولید ماست و بستنی پرداخته شده است. از این فناوری در تولید ماست می‌توان برای بهبود همگن‌سازی و امولسیون‌سازی با کاهش

حباب‌ها با کاهش قطر حباب بیشتر می‌شود و فشار قابل توجه (بالای ۶۰۰۰ گیگاپاسکال) و همزمان دمای داخل حباب‌ها به چند هزار درجه (۷۲۷ تا ۹۷۲۷ درجه سانتیگراد) در میلیون‌ها مکان می‌رسد و مقدار قابل توجهی انرژی (حدود ۱۰۱۸ کیلووات بر متر مکعب) را در مدت زمان کوتاهی تخلیه می‌کنند. بنابراین دما و فشار به طور لحظه‌ای به شدت افزایش می‌یابد و حباب‌های تولید شده فرو می‌ریزند و این وضعیت منجر به پدیده‌ای به نام حفره‌های هیدرودینامیکی^{۱۴} می‌شود. فروپاشی حفره‌ها منجر به اثرات شیمیایی (تولید رادیکال‌های آزاد) و فیزیکی (تولید امواج ضربه‌ای) و تشکیل میکروجت‌های مایع و آشفته‌گی سطحی می‌شود که بر روی اجزای مهمی مانند پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها، لیپیدها و DNA عواقب جبران‌ناپذیری ایجاد می‌کنند. میکروجت‌های ایجاد شده با سرعت ۱۷۵ متر بر ثانیه حرکت و برشی به شدت ۳/۵ کیلو پاسکال ایجاد می‌کنند که می‌تواند باعث پارگی گسترده غشاء و منجر به از بین رفتن اجزای سیتوپلاسمی و پریپلاسمی^{۱۵} سلول شود (شکل ۴) (۲۵).



شکل ۴. نحوه تشکیل میکروجت‌ها و ایجاد امواج ضربه‌ای.

سان و همکاران، در مطالعه‌ی خود برای اولین بار از کاویتاسیون هیدرودینامیکی پیوسته^{۱۶} برای غیرفعال کردن عوامل بیماری‌زا در شیر استفاده کردند. در شیر با سرعت پردازش حدود ۴/۲ لیتر

¹⁴ hydrodynamic cavities

¹⁵ Periplasmic

¹⁶ continuous hydrodynamic cavitation

خواص فیزیکوشیمیایی، میکروارگانیزمها، درجه هیدرولیز پروتئین (DPH) و ... شیر خام مورد مطالعه قرار دادند. کلویتاسیون آکوستیک در شدت‌های مختلف (۲۰۰، ۳۰۰، و ۴۰۰ وات) و زمان (۴، ۶، و ۸ دقیقه) و کلویتاسیون هیدرودینامیک در ۴، ۶، ۸، و ۱۰ پوند بر اینچ مربع برای ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه انجام شده است.

اندازه گلبول‌های چربی شیر، افزایش ویسکوزیته، کاهش زمان تخمیر با بهبود هیدرولیز لاکتوز و تحریک باکتری‌های پروبیوتیک و ... استفاده کرد. در فرآوری بستنی، مزایای خاصی را می‌توان با استفاده از اولتراسوند با شدت بالا در طول فرآیند انجماد مانند کاهش اندازه کریستال یخ، کاهش زمان انجماد و جلوگیری از اتصال به بسته‌بندی به دست آورد (۲۹).

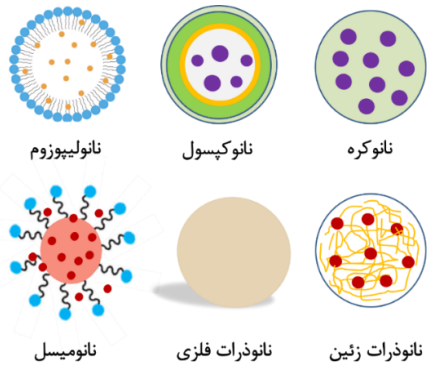
همچنین پگو و همکاران، اثرات کلویتاسیون آکوستیک و کلویتاسیون هیدرودینامیک را بر

جدول ۱. بررسی تاثیر و کاربرد پلاسمای سرد بر برخی خواص شیر و فرآورده‌های لبنی (۴).

نمونه	نوع گاز	روش اعمالی	مدت زمان درمان	فعالیت میکروبی
شیر کامل، شیر نیمه چرب، شیر بدون چربی	هوا	تخلیه کرونا	۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵ و ۲۰ دقیقه	اشریشیا کلی ↓ 54 %
پنیر برش خورده	He, He/O ₂	تخلیه سد دی‌الکتريک	۱- ۱۵ دقیقه	اشریشیا کلی، 1/98-0/5 کاهش log، استافیلوکوکوس اورئوس، 0/91-0/05 کاهش log.
شیر کامل	هوا	تخلیه سد دی‌الکتريک	۵- ۱۰ دقیقه	اشریشیا کلی، لیستریا مونوسیتورنز، سالمونلا تیفی موریوم، 2/4 log cfu/ml کاهش.
شیر خام	هوا	تخلیه کرونا	۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵ و ۲۰ دقیقه	افزایش قابل توجه محتوای آلدئید کل پس از ۲۰ دقیقه از درمان.
آلکالین فسفاتاز (آنزیم شیر)	هوا	تخلیه سد دی‌الکتريک	۵- ۱۰ دقیقه	غیرفعال شدن آنزیم آلکالین فسفاتاز در عرض چند ثانیه، تغییر pH با اعمال حداکثر دما (30 درجه سانتیگراد) مشاهده نشد.
کره	هوا	تخلیه سد دی‌الکتريک	۳- ۳۰ دقیقه	محصولات اکسیداسیون ثانویه افزایش، اسیدهای چرب (اولئیک، پالمیتولئیک، لینولئیک اسید) کاهش
شیر بدون چربی	نیترژن	تخلیه کرونا	۲۰- ۱۲۰ ثانیه	کرونوباکتر ساکازاکی 1/3-17/27 کاهش log

شده با کلویتاسیون آکوستیک و هیدرودینامیک گزارش شده است. بیان شده که میزان غیرفعال شدن میکروب‌ها، آنزیم‌ها و افزایش هیدرولیز پروتئین به پارامترهای فرآوری مانند زمان و شدت، فشار ورودی و قطر دستگاه بستگی دارد (۳۰).

بازده انرژی بالاتری برای کلویتاسیون هیدرودینامیکی در مقایسه با کلویتاسیون آکوستیک بدست می‌آید. همچنین به ترتیب در حدود ۰/۹ و ۰/۷ کاهش log میکروبی در درمان کلویتاسیون هیدرودینامیک و آکوستیک مشاهده می‌شود. افزایش DPH از ۰/۷۱۶ ± ۰/۰۹% به حدود ۰/۵۲ ± ۰/۰۸% و ۳/۶۰۸ ± ۰/۱۵% در نمونه‌های درمان



شکل ۵. طرحواره نانوساختارهای مختلف موجود.

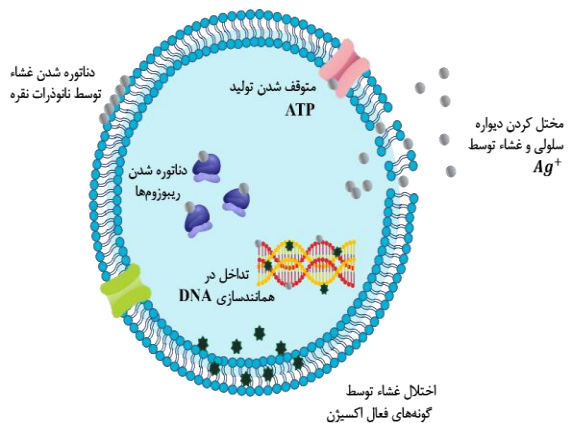
در نهایت می‌توان گفت کاویتاسیون، قابلیت‌های خوبی در کاهش بار میکروبی و خواص فیزیکی شیر و محصولات آن دارد. همچنین می‌تواند تأثیر مثبتی روی باکتری‌های مفید شیر و پروتئین‌ها داشته باشد. با این حال، استفاده از فناوری کاویتاسیون هنوز در مراحل اولیه تحقیق و توسعه برای کاربرد در مقیاس صنعتی برای محصولات لبنی می‌باشد.

۴- نانوذرات در بسته‌بندی مواد غذایی

نانوذرات به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد مانند اندازه، شکل، ترکیب شیمیایی، پایداری فیزیکی و شیمیایی، ساختار بلوری و نسبت مساحت سطح به حجم بزرگتر، در پیشرفت‌های فناوری اهمیت پیدا کرده‌اند. در شکل ۵، طرحواره برخی از نانوساختارهای مورد مطالعه در زمینه علوم غذایی و فرآورده‌های لبنی ارائه شده است. مناسب بودن یک سامانه نانوساختار برای بسته‌بندی، به خواص شیمیایی ترکیب ضد میکروبی نانوساختار مدنظر و ماهیت غذا یا ماده‌ای که در آن قرار دارد مربوط می‌شود. نانوذرات متداول در بسته‌بندی مواد غذایی شامل اکسید تیتانیوم، اکسید روی، اکسید مس، نقره و طلا هستند. با این حال، ذکر این نکته حائز اهمیت است که برخی از نانوساختارها می‌توانند اثرات زیستی نامطلوبی را برای مصرف‌کننده ایجاد کنند. زیرا مواد در مقیاس نانو، خواص و رفتار غیرمنتظره‌ای از خود نشان می‌دهند. این رفتار غیرمنتظره همان چیزی است که منجر به نگرانی در مورد سمیت آن‌ها می‌شود. عوامل مختلفی مانند اندازه سطح، شکل، توزیع بار، واکنش شیمیایی، میزان دوز مصرفی نانوذرات و مدت زمان تماس آن با ماده غذایی مورد نظر، بر سمیت کلی یک نانوذره می‌تواند تأثیر بگذارد. بنابراین تحقیقات بیشتری برای بررسی خطر سمی بودن نانوذرات در دراز مدت، بر سلامتی و اثرات زیستی قبل از استفاده در صنایع غذایی و محصولات لبنی (۳۱، ۳۲) مورد نیاز است.

۴-۱- فرآیندهای ضدباکتری نانوذرات نقره

اگرچه مکانیسم دقیق اثرات ضدباکتریایی نانوذرات نقره به طور کامل مشخص نشده است، اما اقدامات ضدباکتریایی مختلفی در شکل ۴ پیشنهاد شده است. نانوذرات نقره به طور مداوم یون‌های نقره آزاد می‌کنند. به دلیل جاذبه الکترواستاتیکی و تمایل به پروتئین‌های گوگردی، یون‌های نقره می‌توانند به دیواره سلولی و غشای سیتوپلاسمی بچسبند. پس از جذب یون‌های نقره آزاد به داخل سلول‌ها، امکان دارد آنزیم‌های تنفسی غیرفعال شده، گونه‌های فعال اکسیژن تولید شوند و تولید آدنوزین تری‌فسفات متوقف گردد (۳۳). گونه‌های فعال اکسیژن می‌توانند عامل اصلی محرک در اختلال غشای سلولی و تخریب DNA باشند. از آنجایی که گوگرد و فسفر اجزای مهم DNA هستند، برهمکنش یون‌های نقره با گوگرد و فسفر DNA می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی در همانندسازی DNA و تولیدمثل سلولی شده و منتهی به مرگ میکروارگانیسم‌ها شود.



شکل ۴. اثرات ضدباکتریایی نانوذرات نقره.

اما نانوذرات با توزیع اندازه یکنواخت تر تولید می‌کنند (۳۸). بنابراین، جامعه علمی شروع به شناخت روش‌های زیستی برای سنتز نانوذرات نقره از عصاره‌های گیاهی و میکروارگانیسم‌ها به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش‌های شیمیایی و فیزیکی کرده است. روش‌های زیستی مزایای متعددی از جمله هزینه‌های کلی پایین‌تر، تأثیر کمتر بر محیط اطراف، سهولت بیشتر در اجرا و ظرفیت افزایش آسان برای دستیابی به خروجی‌ها با بازدهی بالاتر را ارائه می‌دهند. این روش در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی و زمینه‌های زیست‌پزشکی بیشترین کاربرد را دارند (۴۲-۳۹).

تولید نانوذرات نقره شامل طیف وسیعی از اشکال و اندازه‌های مختلف است که نقش مهمی در تعیین خواص و کاربردهای آنها ایفا می‌کند. پایداری، سمیت و اثربخشی نانوذرات نقره در شرایط مختلف تحت تأثیر اشکال مختلف از جمله مورفولوژی‌های شبه‌کروی، توده‌ای و آگلومره است (۴۳-۴۵). همچنین روش کاهش و فرآیند رشد نانوذرات نقره بسته به عواملی مانند نوع عامل کاهنده، شرایط واکنش و مدت زمان متفاوت است که همگی بر شکل و اندازه نهایی نانوذرات تأثیر می‌گذارند (۴۳).

به عنوان مثال در کار هوآنگ و همکاران گزارش شده است شکل و اندازه نانوذرات نقره با افزایش زمان میکروویو تغییر می‌کند. تقریباً همه شکل‌ها در مدت زمان ۱,۵ دقیقه در میکروویو کروی هستند، اندازه‌های بزرگتر و اشکال هندسی غیرکروی متفاوت بعد از ۳ دقیقه میکروویو ایجاد و پس از ۵ دقیقه میکروویو به نانوسیم تبدیل می‌شوند. باسیلوس سرئوس و باسیلوس مگاتریوم^{۲۳} به همه نانوذرات نقره حساس بودند، اما فعالیت ضدباکتریایی نانوسیم‌های نقره نسبت به سایر اشکال ضعیف‌تر گزارش شده است (۴۶). همچنین در کار دیگری نانوذرات نقره کروی سنتز شده برای خواص ضدباکتریایی در برابر باکتری‌های اشریشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس مورد آزمایش قرار گرفتند. با کاهش اندازه ذرات، تأثیر

علاوه بر این، یون‌های نقره می‌توانند با دناتورده کردن ریبوزوم‌ها در سیتوپلاسم، سنتز پروتئین‌ها را مهار کنند (۳۴). نانوذرات نقره علاوه بر اینکه می‌توانند یون‌های نقره را آزاد کنند، می‌توانند باکتری‌ها را از بین ببرند. نانوذرات نقره انباشته شده می‌توانند باعث دناتورده شدن غشای سلولی شوند. همچنین توانایی نفوذ به دیواره‌های سلولی باکتری‌ها و متعاقباً تغییر ساختار غشای سلولی را به دلیل اندازه نانومتری دارند (۳۵). همچنین محیط اطراف نانوذرات نقره می‌تواند بر آزادسازی یون‌های نقره تأثیر بگذارد. وجود اجزای آلی یا معدنی در محیط می‌تواند بر انحلال نانوذرات نقره از طریق تجمع با نانوذرات یا کمپلکس شدن با یون‌های نقره تأثیرگذار باشند. همچنین نشان داده شده که نانوذرات نقره، یون‌های نقره را سریع‌تر در محلول اسیدی نسبت به محلول خنثی آزاد می‌کنند. باکتری‌های گرم منفی نسبت به نانوذرات نقره حساس‌تر هستند (۳۶).

۴-۲- بررسی روش‌های سنتز و مورفولوژی نانوذرات نقره

تولید نانوذرات نقره را می‌توان با طیف گسترده‌ای از روش‌ها، از جمله روش‌های شیمیایی، فیزیکی و حتی زیستی انجام داد. روش‌های شیمیایی را می‌توان به روش‌های الکتروشیمیایی، تابش به کمک مواد شیمیایی^{۱۷}، پیرولیز^{۱۸} و کاهش شیمیایی^{۱۹} تقسیم کرد. برای سنتز نانوذرات نقره در یک محلول، یک پیش‌ساز فلزی، عوامل احیاکننده و عواملی که می‌توانند محصول را تثبیت^{۲۰} کنند مورد نیاز است. از سوی دیگر، روش‌های فیزیکی نیازی به استفاده از مواد شیمیایی بسیار واکنش‌پذیر ندارند و در مقایسه با روش‌های دیگر بسیار سریع‌تر عمل می‌کنند. نمونه‌هایی از فرآیندهای فیزیکی عبارتند از تخلیه قوس، رسوب فیزیکی بخار^{۲۱}، روش‌های آسیاب توپی انرژی^{۲۲} و کندوپاش مگنترون جریان مستقیم (۳۷). در مقایسه با روش‌های شیمیایی، روش‌های فیزیکی به مقدار بیشتری انرژی نیاز دارند،

¹⁷ irradiation-assisted chemical

¹⁸ pyrolysis

¹⁹ chemical reduction

²⁰ stabilize

²¹ Physical Vapor Deposition

²² energy ball milling techniques

²³ Bacillus megaterium

کلیرمها، مخمرها و کپکها، اشربشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس را مهار می‌کند (۴۹).

براون و همکاران نیز به بررسی اثرات ضد میکروبی و شیمیایی نقره در شیر پرداخته‌اند. استرپتوکوک ترموفیلوس به عنوان نماینده فساد در شرایط گرمادهی و بیشتر به عنوان نمونه‌ای که می‌تواند در گرمای کوتاه مدت زنده بماند انتخاب شده است. آزمایشات ضد میکروبی با اندازه‌گیری اسیدی شدن شیر توسط استرپتوکوکوس ترموفیلوس در دماهای ۴۳، ۳۳ و ۲۳ درجه سانتی‌گراد و غلظت نانوذرات نقره در غلظت‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام شد. غلظت نقره مورد استفاده در شیر بسیار بالا است، این میزان به تدریج کاهش می‌یابد تا حداقل مقدار نقره مورد نیاز برای اثر ضد میکروبی در شیر تعیین شود. مشاهده شد که خواص ضد میکروبی نقره در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بروز می‌کند. از طرفی در غلظت‌های زیر ۵ میلی‌گرم بر لیتر تاثیری بر روی شیر مشاهده نمی‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که یون‌های نقره یا نانونقره می‌توانند از فساد شیر در دماهای بالا جلوگیری کنند. با این حال، غلظت‌های نقره مورد نیاز، بسیار زیاد بوده و لذا استفاده عملی از نقره برای افزایش عمر ماندگاری شیر با افزودن مستقیم آن به شیر (با توجه به این غلظت‌های بسیار بالا) غیرممکن به نظر می‌رسد (۵۰).

میکسیک و همکاران به بررسی تأثیر نانوذرات نقره بر باکتری‌های پروبیوتیک جدا شده از شیر پرداخته‌اند. باکتری‌های پروبیوتیک یکی از مهم‌ترین گروه‌های باکتری به حساب می‌آیند، زیرا برای سیستم گوارشی سودآور هستند. مطالعه آنها نشان داده است که نوع و غلظت محلول‌های نانوذرات نقره تأثیر قابل‌توجهی بر روی باکتری‌های پروبیوتیک آزمایش‌شده دارد. این مطالعه نشان داد که نانوذرات نقره با اندازه ۱۵۰ نانومتر و غلظت ۲ میکروگرم بر میلی‌لیتر و نانوذرات نقره با اندازه ۳۴ نانومتر و غلظت ۰/۲۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر رشد باکتری‌های پروبیوتیک آزمایش‌شده را مهار می‌کنند. بنابراین، یون‌های فلزی همچون نقره، ممکن است تخریب باکتری‌های پروبیوتیک سودآور را تسریع کنند و این موضوع باید قبل از اینکه هر بسته‌بندی

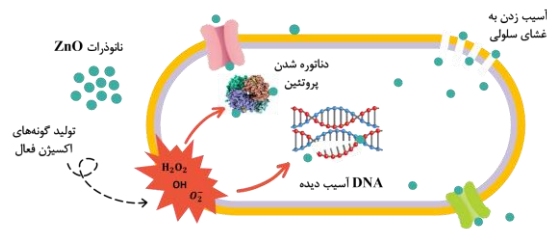
نانوذرات نقره بر باکتری‌ها تقویت شد و در نتیجه یک منطقه بازدارنده بزرگتر برای ذرات کوچکتر مشاهده می‌گردد (۴۷).

۳-۴- استفاده از نانوذرات نقره در بسته‌بندی محصولات لبنی

پیشنهاد شده است که استفاده از نقره در قوطی‌ها یا بسته‌بندی‌های ضد میکروبی شیر می‌تواند راه حلی برای مشکل فساد شیر پاستوریزه یا حتی خام جهت نگهداری یا حمل و نقل آن باشد. نقره به عنوان یک عامل ضد میکروبی شناخته شده و استفاده از عوامل ضدباکتری غیرآلی به دلیل پایداری آن‌ها در دمای بالا ارزشمند است (۳۶). به عنوان مثال، در طی فرآیند قالب‌گیری تزریقی، ماده ضد میکروبی را می‌توان به پلیمری که بسته‌بندی پلاستیکی شیر از آن ساخته می‌شود، تزریق کرد.

کالایسلوی و همکاران اثر ضد میکروبی نانوذرات نقره اعمال شده به فویل آلومینیومی را بر روی دو باکتری به دست آمده از نمونه‌های شیر خام بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که باکتری‌ها در محیط کشت حاوی نانوذرات نقره در مقایسه با محیط رشد بدون نقره تا حدی مهار شدند. با این حال، نانوذرات نقره اعمال شده به فویل آلومینیومی اثر ضد میکروبی قابل توجهی نسبت به فویل آلومینیومی بدون نانوذرات نشان نداده‌اند (۴۸).

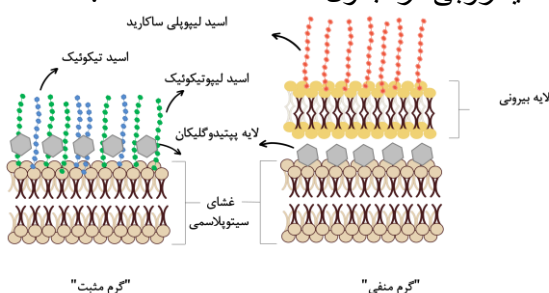
یلدیز و پالا اثرات ضد میکروبی نانوذرات نقره با قطر ۶ تا ۸ نانومتر را بر روی شیر گاو آزمایش کردند. هدف از تحقیقات آن‌ها پایین نگه داشتن رشد باکتری در شیر تا زمان پردازش حرارتی بود. به عنوان مثال سیستم‌های شیردوشی خودکار یا مواردی مانند قوطی‌های شیر، مخازن حجیم و لوله‌های شیر با استفاده از نانوذرات نقره پوشش داده شد. آن‌ها از نانوذرات نقره تولید شده توسط گاز متراکم با ولتاژهای متغیر (۰، ۱۰۰ یا ۲۰۰ ولت) برای پوشش نوارهای فلزی استفاده کردند. شیر برای زمان‌های مختلف (۱ ثانیه، ۳۰ ثانیه، ۱۰ دقیقه، ۱ ساعت و ۱۰ ساعت) و دماهای (۱۰، ۱۸ و ۲۲ درجه سانتی‌گراد) درمان شد. نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که نانوذرات نقره رشد باکتری را کنترل می‌کنند، چه در مدت درمان ۱ ثانیه، ۱ ساعت یا ۱۰ ساعت باشد. همچنین نانوذرات رشد همه میکروارگانیسم‌ها (TAC)،



شکل ۵. اثرات ضدباکتریایی نانوذرات اکسیدروی.

در مقایسه با باکتری‌های گرم مثبت، پتانسیل منفی بالاتری توسط باکتری‌های گرم منفی به دلیل وجود یک لایه لیپوپلی‌ساکارید اضافی با پتانسیل منفی نشان داده می‌شود (شکل ۶). بنابراین مشخص شد که غشای سلولی استافیلوکوکوس اورئوس بار منفی کمتری نسبت به غشای سلولی اش‌ریشیاکلی دارد و این موضوع دلیلی برای افزایش مقاومت در برابر فعالیت نانوذرات اکسیدروی در اش‌ریشیاکلی است (۵۲).

بسته‌بندی مواد غذایی ضد میکروبی حاوی نانوذرات اکسیدروی را می‌توان با دو نوع ماده انجام داد: نانوکامپوزیت‌های زیستی و نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نفت (۵۳). اخیراً مطالعه بسیاری بر روی مواد نانوکامپوزیت با ماتریس‌های پلیمری، مانند پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌لاکتیک اسید (PLA) و پلی‌وینیل الکل (PVA) گزارش شده است. نمونه‌هایی از بسته‌بندی مواد غذایی ضد میکروبی در جدول ۲ خلاصه شده است.



شکل ۶. ویژگی‌های غشای باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی.

پلی‌پروپیلن (PP) یکی از پلیمرهای ترموپلاستیک تجاری شده است که به طور گسترده در صنایع مختلف به دلیل چگالی کم، هزینه کم، سهولت در فرآیند، مقاومت شیمیایی و همچنین خواص مکانیکی عالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پلی‌پروپیلن اغلب با فوتوکاتالیست‌های نانو ساختار، یعنی ZnO و TiO₂ برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها ترکیب شده است. نانوذرات ZnO

نانوکامپوزیت ضد میکروبی به بازار عرضه شود، مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد (۵۱).

در مجموع می‌توان گفت که نانوذرات نقره به خاطر خواص ضد میکروبی عالی خود کاملاً شناخته شده هستند. مطالعات نشان می‌دهند که نانوذرات نقره می‌توانند به عنوان عامل ضد میکروبی در بسته‌بندی شیر و لوله‌ها و دستگاه‌های شيردوشی نیز به کار گرفته شوند. آنها بار میکروبی را کاهش می‌دهند ولی در غلظت‌های معمول (زیر ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) توان جلوگیری از فساد شیر را ندارند. همچنین اطمینان از نحوه اثر نانوذرات نقره بر باکتری‌های مفید شیر ضروری است.

۵- فرآیندهای ضد باکتری نانوذرات اکسیدروی

نانوذرات اکسیدروی (ZnO) یکی دیگر از نانوذرات مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی به عنوان یک عامل ضد میکروبی فعال است. به طور کلی، هنگامی که اندازه ذرات کاهش می‌یابد، فعالیت ضدباکتریایی آن افزایش می‌یابد. فعالیت ضدباکتریایی ZnO نتیجه تابش نور مرئی و تماس مستقیم آن با دیواره سلولی میکروبی است. فعالیت ضدباکتریایی ZnO منجر به تخریب یکپارچه سلول باکتری بر اثر آزاد شدن یون‌های ضد-میکروبی Zn²⁺ و تولید گونه‌های اکتسیژن فعال می‌شود.

شکل ۵ نشان می‌دهد که استرس اکسیداتیو^{۲۴} تولید شده توسط نانوذرات ZnO تأثیر زیادی بر فعالیت ضدباکتریایی دارد. تشکیل یون‌های Zn²⁺ از ZnO و برهمکنش آن‌ها با آنزیم‌های تنفسی، از عملکرد این آنزیم‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین نانوذرات اکسیدروی توانایی آسیب رساندن به غشای سلولی و تولید ROS (Reactive Oxygen Species) گونه‌های اکتسیژن فعال) را دارند. بنابراین، آسیب غیرقابل برگشت به غشای سلولی باکتری، DNA و میتوکندری با جذب یون‌های Zn²⁺ رخ می‌دهد که با تشکیل ROS و رادیکال‌های آزاد باعث استرس اکسیداتیو و مهار عمل آنزیم‌های تنفسی و در نهایت مرگ می‌شود.

²⁴ oxidative stress

کاهش اندازه بلور (۴۶/۱۹، ۴۱/۶۶ و ۳۴/۷۴ نانومتر) و افزایش زمان واکنش باعث افزایش اندازه (۴۴/۷۶، ۵۳/۵۱ و ۷۸/۲۱ نانومتر) می‌شود (۵۸). مورفولوژی‌های مختلف نانوذرات اکسیدروی نیز بر فعالیت ضد میکروبی تأثیر گذاشته است. بنابراین، کنترل پارامترهای آزمایشی مانند حلال‌ها، انواع پیش‌سازها و تنظیمات فیزیکی شیمیایی، از جمله دما و pH ضروری است. مشخص شده است که نانوذرات مکعبی شکل در مقایسه با ذرات کروی و شش‌ضلعی فعالیت ضد-باکتریایی بیشتری دارند (۵۹). همچنین گزارش شده است که نانوذرات اکسیدروی گل‌مانند نسبت به نانوذرات اکسیدروی کروی، فعالیت آنتی‌باکتریال بالاتری را علیه استافیلوکوکوس اورئوس و اشریشیاکلی نشان می‌دهند (۶۰).

۲-۵- نانوذرات اکسیدروی در بسته‌بندی

پراسرت و همکاران، نانوکامپوزیتی از ترکیب پلی‌پروپیلن (PP) و نانوذرات ZnO، با استفاده از یک اکسترودر دو ماریچ تهیه کردند. تصاویر SEM تهیه شده نشان داد که نانوذرات ZnO به خوبی در ماتریس PP توزیع شده‌اند. تخریب خواص مکانیکی و ساختارهای شیمیایی در نانوکامپوزیت قبل و بعد از قرار گرفتن در معرض نور خورشید مورد بررسی قرار گرفت. در کوتاه-ترین زمان تابش نور خورشید، اتصالات عرضی می‌تواند در نانوکامپوزیت‌ها رخ دهد که منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود. با این حال، قرار گرفتن در معرض نور خورشید با دوره زمانی بیش از ۱۸ هفته باعث کاهش خواص مکانیکی، به دلیل تخریب ماتریس پلی‌پروپیلن شد. این نتیجه برای توسعه مواد نانوکامپوزیت و حل مشکل پلاستیک بسیار سودمند خواهد بود. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌های ضد باکتری نشان داد که نانوکامپوزیت‌ها، دارای خواص ضدباکتریایی بهتری نسبت به PP خالص هستند (۶۱). در مطالعه کیوینسکا و همکاران نیز به بررسی روش‌های تهیه نانوکامپوزیت‌های اکسیدروی-پلی‌پروپیلن و خواص ضدباکتریایی آنها با استفاده از فرآیند اکستروژن پرداخته شده است. در این روش از پلی‌پروپیلن به شکل دانه‌ای استفاده شده که می‌تواند به راحتی به یک محصول مفید تبدیل شود. کامپوزیت اکسیدروی-پلی‌پروپیلن ساخته شده دارای خواص مکانیکی قابل توجهی در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص است. همچنین این کامپوزیت‌ها دارای

امیدوارکننده‌ای با فعالیت فوتوکاتالیستی بالا، زیست‌سازگاری و غیرسمی بودن برای سلول‌های انسانی هستند.

۵-۱- بررسی روش‌های سنتز و مورفولوژی نانوذرات اکسیدروی

برای سنتز نانوذرات اکسیدروی روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی توسعه یافته‌اند. روش‌های فیزیکی شامل رسوب لیزر پالسی، کندوپاش مگنترون، رسوب الکترونی و تبخیر به کمک پرتو الکترونی^{۲۵} است. روش سنتز شیمیایی شامل روش‌های هیدروترمال، حلال‌گرمایی، سل-ژل، رسوب حمام شیمیایی، فرآیند شیمیایی مرطوب، اسپری پیرولیز^{۲۶}، میکرومولسیون و روش‌های رسوب‌گذاری است. سنتز زیستی یا سبز نانومواد اکسیدفلزی به واسطه گیاهی یا میکروبی انجام می‌شود. این نانومواد زیست‌سازگار هستند و کاربردهای فراوانی در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی و زمینه‌های زیست‌پزشکی دارند (۵۴-۵۵). اگرچه سنتز شیمیایی برای محیط زیست سمی است اما در این روش بلورهای خالص با پایداری و عملکرد بالا تولید می‌شوند. یکی از روش‌های مرسوم برای تولید نانوذرات اکسیدروی روش هیدروترمال است. در این روش سنتز، نانوذرات ZnO با استفاده از حرارت و فشار بالا (۱۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و ۱-۱۰۰۰۰ اتمسفر) و آب به عنوان حلال در اتوکلاو انجام می‌شود. اگرچه بلورهای با کیفیت خوب تولید می‌شوند، مصرف انرژی بالا و استفاده از اتوکلاوهای گران قیمت از معایب این روش به حساب می‌آید. روش گرمایش ممکن است معمولی یا مایکروویو باشد که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند (۵۶). هنگامی که دما، مدت زمان و غلظت پیش‌ماده فرآیند هیدروترمال تغییر می‌کند، شکل و اندازه ذرات را می‌توان تنظیم کرد (۵۷). به عنوان مثال نانوبلورهای ZnO با استفاده از حرارت‌دهی اتوکلاو در دمای بین ۱۰۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱-۵ ساعت توسط ولاکات و همکاران سنتز شدند. این مطالعه گزارش داد که تغییر دما و زمان واکنش مورفولوژی‌های متنوعی (گل‌مانند، میله و گرانول کروی) ایجاد می‌کند. این مطالعه همچنین گزارش داد که افزایش زمان دماهی باعث

²⁵ Electron Beam Evaporation

²⁶ spray pyrolysis

خواص ضدباکتری در برابر استافیلوکوکوس اورئوس، اشرشیاکلی و کلبسیلا پنومونیه می‌باشند (۶۲).

همچنین سیلستر و همکاران نیز مطالعه‌ای با هدف توسعه فیلم‌های مبتنی بر پلی‌پروپیلن ایزوتاکتیک (iPP) برای کاربرد بسته‌بندی مواد غذایی با استفاده از ZnO داشته‌اند. برای بهبود سازگاری با پلی‌پروپیلن ایزوتاکتیک، ذرات ZnO با اسید استناریک (ZnOc) پوشانده شدند تا امکان تشکیل یک کامپوزیت با توزیع یکنواخت نانوذرات را فراهم کند. کامپوزیت‌های مبتنی بر پلی‌پروپیلن ایزوتاکتیک با ۲ و ۵ درصد وزنی اکسیدروی در یک اکسترودر دو مارپیچ تهیه شدند. دستاورد اصلی این کامپوزیت‌ها فعالیت ضدباکتریایی قوی علیه اشرشیاکلی است. پس از ۴۸ ساعت، برای نمونه حاوی ۵ درصد اکسیدروی، کاهش باکتری به میزان قابل توجه ۹۹/۹۹ درصد می‌رسد. برای

نمونه حاوی ۲ درصد اکسیدروی، کاهش باکتری پس از پنج روز به این مقادیر می‌رسد. در نتیجه، فیلم‌های کامپوزیت حاوی ۵ درصد اکسیدروی دارای خاصیت ضدباکتریایی مناسب‌تری در برابر اشرشیاکلی، پایداری حرارتی بالاتر و خواص مکانیکی بهبود یافته‌تری نسبت به فیلم پلی‌پروپیلن ایزوتاکتیک خالص هستند (۶۳). در کار مینیا و همکاران فیلم‌های پلی‌اتیلن (PE) با مستربج‌های حاوی روی-اکسیدروی آبدوست (ZO) و استنارات روی آبگریز (ZS)- برای فعالیت ضد میکروبی علیه سویه‌های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس مورد ارزیابی قرار گرفتند. مورفولوژی نمونه‌ها با آزمون SEM مطالعه شد و همچنین ترکیب، شفافیت و خواص مکانیکی فیلم‌ها و نیز سطح مهاجرت نانوذرات از فیلم‌ها بررسی شدند. تصاویر SEM پراکندگی خوب اکسیدروی در ماتریس پلی‌اتیلن را تایید کردند.

جدول ۲. خلاصه‌ای از بسته‌بندی‌های انجام شده برای مواد غذایی مختلف با استفاده از نانوذرات اکسید روی (۵۳).

محصول غذایی	روش تهیه فیلم	غلظت ZnO (درصد)	اندازه و مورفولوژی ZnO	بسته‌بندی مواد غذایی ضد میکروبی
نانوکامپوزیت‌های زیستی				
فیله مرغ و پنیر	قالبگیری حلال	5	30 نانومتر	ژلاتین/ZnO
میگو	قالبگیری حلال	2	25-55 نانومتر - نانولوله	کربوکسی متیل سلولز/ZnO
پنیر سفید	قالبگیری حلال	0/5، 1 و 2	<25 نانومتر	کیتوزان-کربوکسی متیل سلولز/ZnO
-	اکسترورژن	2-10	100 نانومتر	سوکسینات پلی بوتیلن/ZnO
ماهی	قالبگیری حلال	0/5، 1 و 1/5	-	پلی اسید لاکتیک / ZnO
پنیر موزارلا	قالبگیری حلال	1، 3 و 5	50-100 نانومتر قطر و 2-0/5 میکرومتر طول- نانولوله	سمولینا/ZnO/کانولن
نانوکامپوزیت بر پایه نفت				
توت فرنگی	اکسترورژن	1، 3 و 5	<10 نانومتر	پلی‌اتیلن کم چگال/ZnO
آب لیمو تازه	اکسترورژن	0/5، 1، 3 و 5	70 نانومتر	پلی‌پروپیلن / ZnO و پلی‌پروپیلن / Ag
هویج	قالبگیری حلال	1، 3 و 5	30 نانومتر	پلی‌اورتان / کیتوزان / ZnO

نمایش می‌دهد. برای توضیح بیشتر در مورد چند مطالعه، موتلیکا و همکاران به بررسی اثرات نانوذرات نقره و اسانس علف‌لیمو بر فعالیت ضد-باکتریایی سویه‌های گرم مثبت (باسیلوس سرئوس و استافیلوکوکوس اورئوس) و گرم منفی (اشریشیاکلی و سالمونلا تیفی) در پنیر (Telemea) پرداخته‌اند. بهترین نتایج در برابر باسیلوس سرئوس به دست آمد. آزمایشات نشان می‌دهد که فیلم‌های ضد-میکروبی را می‌توان به عنوان بسته‌بندی برای حفظ رنگ، بافت سطحی و نرمی پنیر به مدت ۱۴ روز استفاده کرد (۶۶). کوچک و همکاران نیز لایه‌های آلزینات و زین (دو پلیمر طبیعی) حاوی ناتامایسین (یک عامل ضدقارچ طبیعی) ساختند و از آنها برای محدود کردن و جلوگیری از رشد کپک در سطح پنیر کاشار بهره گرفتند. لایه‌ها با روش قالب‌گیری تهیه و از نظر خواص ضد میکروبی و مکانیکی و مورفولوژی با میکروسکوپ الکترونی روشی (۲۷) مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی لایه‌های زین ضعیف‌تر از فیلم‌های آلزینات بود. تجزیه و تحلیل SEM نشان داد که فیلم‌های آلزینات ساختار منظم‌تری نسبت به فیلم‌های زین دارند و توزیع همگن‌تری در غلظت‌های پایین‌تر ناتامایسین مشاهده شد. فعالیت ضدقارچی هر دو فیلم با افزایش غلظت ناتامایسین (۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ ppm) افزایش یافت.

اثر استفاده از هر دو مستریج بر افزایش فعالیت ضد میکروبی علیه دو سویه باکتریایی مطالعه شد. مستریج ZO شفافیت فیلم‌ها را کاهش، استحکام کششی و فعالیت ضد میکروبی فیلم‌ها را در برابر سویه‌های اشریشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس بهبود بخشید، در حالی که مستریج ZS پارامترهای آزمایش شده را به طور قابل توجهی تغییر نداد (۶۴). اثر ضخامت کامپوزیت‌های ساخته شده با استفاده از نانوذرات اکسیدروی با هدف بررسی فعالیت ضد میکروبی باکتری‌های گرم مثبت و منفی در مطالعه درویش و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار از کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن کم چگالی خطی (LLDP) (نوع متداول پلی‌اتیلن در کاربرد بسته‌بندی مواد غذایی) استفاده شده است. با استفاده از اکستروژن، لایه‌های LLDPE/ZnO با ضخامت متفاوت از ۱/۵ تا ۱۲ میکرومتر تولید شدند. کاهش ضخامت لایه به ۲-۱/۵ میکرومتر، فعالیت ضد میکروبی فیلم را افزایش می‌دهد. کاهش ضخامت لایه به ۲ نانومتر به ترتیب \log^3 و \log^4 کاهش را برای اشریشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس ایجاد کرد (۶۵). در میان چندین فرآورده لبنی، عوامل ضد میکروبی در بسته‌بندی پنیر نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این بسته‌بندی‌های پیشرفته می‌توانند کنترل میکروبیولوژی عالی و الزامات ایمنی غذایی بالاتری را ارائه دهند. جدول ۳ مطالعات مختصر در مورد بسته‌بندی‌های ضد میکروبی قابل اجرا برای انواع مختلف پنیر را

جدول ۳- نمونه‌هایی از بسته‌بندی ضد میکروبی قابل استفاده برای انواع مختلف پنیر (۶۷).

ماده مورد استفاده	باکتری مورد بررسی	نوع فیلم	نوع پنیر
لینالول یا تیمول (1-1/5-2 درصد)	اشریشیاکلی، استافیلوکوکوس اورئوس، لیستریا اینوکوا و ساکارومایسس سرویسیا	پلی اتیلن	پنیر موزارالا
نانوذرات نقره و اسانس علف لیمو	باسیلوس سرئوس، استافیلوکوکوس اورئوس، اشریشیاکلی و سالمونلا تیفی	فیلم آلزینات	پنیر Telemea
بنزوات سدیم (ASF-SB)، اسید سیتریک (ASF-CA) و هر دو (ASF-CASB)	لیستریا اینوکوا	فیلم‌های نشاسته‌ای	پنیر چدار ورقه شده
ناتامایسین	آسپرژیلوس نایجر و پنی سیلیوم کامبرتی	فیلم‌های آلزینات و زین	پنیر کاشار
مونولورین (0/5 و 1٪ میلی‌لیتر)	لیستریا مونوسیژنوز	فیلم‌های سلولزی-کیتوسان	پنیر سفید UF
نانوکامپوزیت کیتوزان اکسید روی	لیستریا مونوسیژنوز	کاغذ سلولزی	پنیر UF

پنیر فتا	فیلم‌های مبتنی بر زین	سالمونلا انتریتیدیس، لیستریا مونوسی‌توزنز، استافیلوکوکوس اورئوس، اش‌ریشیا کلی	اسانس آویشن
پنیرچدار	پلی‌اتیلن کم چگال و فیلم- های سلولزی	محدود کردن توسعه پاتوژن‌های مختلف	پپتید باسیلوس لیکنیفورمیس
پنیر UF	پلی‌اتیلن با چگالی کم	باکتری‌های کلیفرم	نانوذرات نقره، اکسید مس و اکسید روی

۶- بحث و نتیجه‌گیری

روش‌های پلاسما و کاویتاسیون برای پاستوریزه کردن شیر سرد معرفی شدند. از این دو روش، به نظر می‌رسد کاویتاسیون حالت تهاجمی کمتری داشته و خواص شیر را بهتر حفظ می‌کند. از این جهت، تاکنون در صنعت نیز مورد بهره‌برداری قرار گرفته و تأثیرات مثبت آن بر محصولات لبنی گزارش شده است. این گزارش‌ها اشاره بر بهبود طعم، رنگ و کیفیت مواد لبنی (حفظ پروتئین و کلسیم) فرآوری شده با روش نانو کاویتاسیون دارند (۷۰).

بسته‌بندی‌های پلاستیکی با لایه روبی نقره برای مواد غذایی در حال حاضر در حال فروش هستند (۷۱، ۷۲) در این بسته بندی، نقره به صورت لایه نازک روی ظروف قرار گرفته که خواص ضدباکتری قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می‌دهد (۷۳). اما در پژوهش‌های ذکر شده در این مقاله، نانوذرات مورد استفاده وارد بستر پلیمری بسته‌بندی می‌شوند. در نتیجه تنها زمانی که پلیمرهای سازنده پلاستیک (مثلاً در دمای بالا) آسیب ببینند امکان نشت نانوذرات به درون ماده غذایی وجود دارد.

مطالعات بیشتر در این زمینه نشان می‌دهند که در صورتی که ماده غذایی خاصیت اسیدی داشته باشد، امکان مهاجرت مقدار بسیار جزئی از نانوذره (نقره) به ماده غذایی وجود دارد. در مورد نانوذرات نقره این امر جدی هست چون امکان سمیت وجود دارد (۷۴). اما نانوذرات روی نگرانی سمیت را ندارند؛ به دلیل اینکه خود یک مکمل خوراکی هستند و به طور مستقیم نیز برای افزایش کیفیت ماده غذایی به آن اضافه می‌شوند (۷۵، ۷۶). استفاده از مواد جاذب رطوبت و دیگر گازها نیز برای افزایش عمر مواد لبنی به کار گرفته شده است (۷۷، ۷۸) لازم به توضیح است که پژوهش‌های جدیدتر در مقیاس آزمایشگاهی به استفاده

با این حال، فیلم‌های آلزینات فعالیت ضدقارچی نسبتاً بالایی از خود نشان دادند. تأثیر فیلم‌ها بر ماندگاری پنیرهای کاشار در یخچال به مدت ۴۵ روز بررسی شد. در غلظت‌های بالای ناتامایسین، فیلم‌های زین فعالیت ضدقارچی بالاتری را علیه هر دو قارچ (آسپرژیلوس نایجر و پنی‌سیلیوم کامبرتی) در پایان دوره ذخیره‌سازی نشان دادند (۶۸).

در مطالعه‌ی دیگری، خواص ضدباکتریایی فیلم‌های بسته‌بندی پلی‌اتیلن با چگالی کم حاوی نانوذرات نقره (Ag)، اکسیدمس (CuO) و اکسیدروی (ZnO) برای کاهش رشد باکتری‌های کلیفرم در پنیر UF بررسی شده است. کامپوزیت‌های اولیه LDPE/نانوذره با روش اکستروژن و دستیابی به ضخامت لایه 5 ± 45 میکرومتر تولید شدند. تعداد باکتری‌های کلیفرم زنده مانده پس از ۴ هفته نگهداری در دمای 5 ± 4 درجه سانتی‌گراد به میزان $4/21 \log \text{cfu/g}$ کاهش یافت. در حالی که فیلم‌های LDPE خالص تنها کاهش $1/04 \log \text{cfu/g}$ را نشان دادند (۶۹).

در مجموع می‌توان گفت که نانوذرات اکسید روی به دلیل اینکه به عنوان یک مکمل غذایی قابل مصرف هستند و همچنین خواص ضد میکروبی برای بسته‌بندی دارند، مورد توجه بوده‌اند. انواع مختلفی از فیلم‌ها با روش‌های مختلف ساخته شده‌اند که در آنها نانوذره داخل ماتریس پلیمری قرار می‌گیرد. این فیلم‌ها خواص مکانیکی بهبود یافته را در کنار خاصیت ضد میکروبی از خود نشان می‌دهند.



<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814921-8.00003-7>

[7] Misra, N., & Jo, C. (2017). Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry. *Trends in Food Science & Technology*, 64, 74-86.

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.04.005>

[8] Misra, N., Yopez, X., Xu, L., & Keener, K. (2019). In-package cold plasma technologies. *Journal of Food Engineering*, 244, 21-31. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13318>

[9] Timmons, C., Pai, K., Jacob, J., Zhang, G., & Ma, L. M. (2018). Inactivation of Salmonella enterica, Shiga toxin-producing Escherichia coli, and Listeria monocytogenes by a novel surface discharge cold plasma design. *Food Control*, 84, 455-462. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.09.007>

[10] Thirumdas, R., Sarangapani, C., & Annapure, U. S. (2015). Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing. *Food biophysics*, 10, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11483-014-9382-z>

[11] Thirumdas, R., & Annapure, U. S. (2020). Enzyme inactivation in model systems and food matrixes by cold plasma. In *Advances in cold plasma applications for food safety and preservation* (pp. 229-252). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814921-8.00007-4>

[12] Rodacka, A., Gerszon, J., Puchala, M., & Bartosz, G. (2016). Radiation-induced inactivation of enzymes—Molecular mechanism based on inactivation of dehydrogenases. *Radiation Physics and Chemistry*, 128, 112-117.

از عصاره‌ها و اسانس‌های گیاهی درون نانوساختارها به عنوان مواد ضدباکتری می‌پردازند (۸۰، ۷۹).

۷-منابع

[1] Misra, N., Pankaj, S., Segat, A., & Ishikawa, K. (2016). Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.001>

[2] Pankaj, S., Shi, H., & Keener, K. M. (2018). A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin in food. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.007>

[3] Sharma, S. (2020). Cold plasma treatment of dairy proteins in relation to functionality enhancement. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.013>

[4] Coutinho, N. M., Silveira, M. R., Rocha, R. S., Moraes, J., Ferreira, M. V. S., Pimentel, T. C., Freitas, M. Q., Silva, M. C., Raices, R. S., & Ranadheera, C. S. (2018). Cold plasma processing of milk and dairy products. *Trends in Food Science & Technology*, 74, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.008>

[5] Misra, N., Schlüter, O., & Cullen, P. (2016). Plasma in food and agriculture. In *Cold plasma in food and agriculture* (pp. 1-16). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00001-9>

[6] Corradini, M. G. (2020). Modeling microbial inactivation during cold atmospheric-pressure plasma (CAPP) processing. In *Advances in cold plasma applications for food safety and preservation* (pp. 93-108). Elsevier.



<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.149>

[18] Sarangapani, C., Keogh, D. R., Dunne, J., Bourke, P., & Cullen, P. (2017). Characterisation of cold plasma treated beef and dairy lipids using spectroscopic and chromatographic methods. *Food chemistry*, 235, 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.016>. Epub 2017 May 6.

[19] Gurol, C., Ekinci, F., Aslan, N., & Korachi, M. (2012). Low temperature plasma for decontamination of E. coli in milk. *International journal of food microbiology*, 157(1), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.02.016>

[20] Ebina, K., Shi, K., Hirao, M., Hashimoto, J., Kawato, Y., Kaneshiro, S., Morimoto, T., Koizumi, K., & Yoshikawa, H. (2013). Oxygen and air nanobubble water solution promote the growth of plants, fishes, and mice. *PLoS One*, 8(6), e65339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065339>

[21] Oh, S. H., Yoon, S. H., Song, H., Han, J. G., & Kim, J.-M. (2013). Effect of hydrogen nanobubble addition on combustion characteristics of gasoline engine. *International journal of hydrogen energy*, 38(34), 14849-14853. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.063>

[22] Wang, Y., Li, X., Zhou, Y., Huang, P., & Xu, Y. (2010). Preparation of nanobubbles for ultrasound imaging and intracellular drug delivery. *International journal of pharmaceutics*, 384(1-2), 148-153.

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.05.022>

[13] Kim, H.-J., Yong, H. I., Park, S., Kim, K., Choe, W., & Jo, C. (2015). Microbial safety and quality attributes of milk following treatment with atmospheric pressure encapsulated dielectric barrier discharge plasma. *Food Control*, 47, 451-456. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.07.053>

[14] Lee, H.-J., Jung, S., Jung, H.-S., Park, S.-H., Choe, W.-H., Ham, J.-S., & Jo, C. (2012). Evaluation of a dielectric barrier discharge plasma system for inactivating pathogens on cheese slices. *Journal of Animal Science and Technology*, 54(3), 191-198. <https://doi.org/10.5187/JAST.2012.54.3.191>

[15] Yong, H. I., Kim, H.-J., Park, S., Kim, K., Choe, W., Yoo, S. J., & Jo, C. (2015). Pathogen inactivation and quality changes in sliced cheddar cheese treated using flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma. *Food Research International*, 69, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.008>

[16] Wan, Z., Pankaj, S., Mosher, C., & Keener, K. M. (2019). Effect of high voltage atmospheric cold plasma on inactivation of *Listeria innocua* on Queso Fresco cheese, cheese model and tryptic soy agar. *Lwt*, 102, 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.096>

[17] Chen, D., Peng, P., Zhou, N., Cheng, Y., Min, M., Ma, Y., Mao, Q., Chen, P., Chen, C., & Ruan, R. (2019). Evaluation of *Cronobacter sakazakii* inactivation and physicochemical property changes of non-fat dry milk powder by cold atmospheric plasma. *Food chemistry*, 290, 270-276.



- [28] Akdeniz, V., & Akalin, 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. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1830027>
- [29] Akdeniz, V., & Akalin, A. S. (2019). New approach for yoghurt and ice cream production: High-intensity ultrasound. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 392-398. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.046>
- [30] Pegu, K., & Arya, S. S. (2021). Comparative assessment of HTST, hydrodynamic cavitation and ultrasonication on physico-chemical properties, microstructure, microbial and enzyme inactivation of raw milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 69, 102640. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102640>
- [31] de Oliveira Mallia, J., Galea, R., Nag, R., Cummins, E., Gatt, R., & Valdramidis, V. (2022). Nanoparticle food applications and their toxicity: current trends and needs in risk assessment strategies. *Journal of Food Protection*, 85(2), 355-372. <https://doi.org/10.4315/JFP-21-184>
- [32] Brandelli, A. (2020). The interaction of nanostructured antimicrobials with biological systems: Cellular uptake, trafficking and potential toxicity. *Food Science and Human Wellness*, 9(1), 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.12.003>
- [33] Ramkumar, V. S., Pugazhendhi, A., Gopalakrishnan, K., Sivagurunathan, P., Saratale, G. D., Dung, T. N. B., & Kannapiran, E. (2017). Biofabrication and characterization of silver nanoparticles using aqueous extract of seaweed *Enteromorpha compressa* and its <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2009.09.027>
- [23] Hayakumo, S., Arakawa, S., Takahashi, M., Kondo, K., Mano, Y., & Izumi, Y. (2014). Effects of ozone nanobubble water on periodontopathic bacteria and oral cells-in vitro studies. *Science and Technology of Advanced Materials*, 15(5), 055003. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/5/055003>
- [24] Arya, S. S., More, P. R., Ladole, M. R., Pegu, K., & Pandit, A. B. (2023). Non-thermal, energy efficient hydrodynamic cavitation for food processing, process intensification and extraction of natural bioactives: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 106504. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106504>
- [25] Javed, M., Matloob, A., Ettoumi, F. E., Sheikh, A. R., Zhang, R., & Xu, Y. (2023). Novel nanobubble technology in food science: Application and mechanism. *Food Innovation and Advances*, 2(2), 135-144. <https://doi.org/10.48130/FIA-2023-0014>
- [26] Sun, X., Xuan, X., Ji, L., Chen, S., Liu, J., Zhao, S., Park, S., Yoon, J. Y., & Om, A. S. (2021). A novel continuous hydrodynamic cavitation technology for the inactivation of pathogens in milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 71, 105382. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105382>
- [27] Mohammadi, V., Ghasemi-Varnamkhasi, M., Ebrahimi, R., & Abbasvali, M. (2014). Ultrasonic techniques for the milk production industry. *Measurement*, 58, 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.022>



- [38] Naganthran, A., Verasoundarapandian, G., Khalid, F. E., Masarudin, M. J., Zulkharnain, A., Nawawi, N. M., et al. (2022). Synthesis, characterization and biomedical application of silver nanoparticles. *Materials* 15, 427. doi:10.3390/ma15020427
- [39] Saygi, K. O., Bayram, H. M., & Bayram, E. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles using artichoke flower petals and application in endodontic dentistry. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(4), 5531-5539. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02857-8>
- [40] Haris, Z., & Ahmad, I. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles using *Moringa oleifera* and its efficacy against gram-negative bacteria targeting quorum sensing and biofilms. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 10(1), 156-167. <https://doi.org/10.1007/s43994-023-00089-8>
- [41] Ahmadi, F., & Lackner, M. (2024). Green Synthesis of Silver Nanoparticles from *Cannabis Sativa*: Properties, Synthesis, Mechanistic Aspects, and Applications. *ChemEngineering*, 8(4), 64. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8040064>
- [42] Vadakkan, K., Rumjit, N. P., Ngangbam, A. K., Vijayanand, S., & Nedumpillil, N. K. (2024). Novel advancements in the sustainable green synthesis approach of silver nanoparticles (AgNPs) for antibacterial therapeutic applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 499, 215528. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215528>
- [43] Fouad, H., Yang, G., El-Sayed, A. A., Mao, G., Khalafallah, D., Saad, M., ... & biomedical properties. *Biotechnology reports*, 14, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.02.001>
- [34] Durán, N., Nakazato, G., & Seabra, A. B. (2016). Antimicrobial activity of biogenic silver nanoparticles, and silver chloride nanoparticles: an overview and comments. *Applied microbiology and biotechnology*, 100, 6555-6570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.02.001>
- [35] Liao, C., Li, Y., & Tjong, S. C. (2019). Bactericidal and cytotoxic properties of silver nanoparticles. *International journal of molecular sciences*, 20(2), 449. <https://doi.org/10.3390/ijms20020449>
- [36] Jacob, J. M., John, M. S., Jacob, A., Abitha, P., Kumar, S. S., Rajan, R., Natarajan, S., & Pugazhendhi, A. (2019). Bactericidal coating of paper towels via sustainable biosynthesis of silver nanoparticles using *Ocimum sanctum* leaf extract. *Materials Research Express*, 6(4), 045401. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aafaed>
- [36] Meikle, T. G., Dyett, B. P., Strachan, J. B., White, J., Drummond, C. J., & Conn, C. E. (2020). Preparation, characterization, and antimicrobial activity of cubosome encapsulated metal nanocrystals. *ACS applied materials & interfaces*, 12(6), 6944-6954. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b21783>
- [37] Dhir, R., Chauhan, S., Subham, P., Kumar, S., Sharma, P., Shidiki, A., & Kumar, G. (2024). Plant-mediated synthesis of silver nanoparticles: unlocking their pharmacological potential—a comprehensive review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1324805. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1324805>



- [49] Yildiz, N., & Pala, A. (2012). Effects of small-diameter silver nanoparticles on microbial load in cow milk. *Journal of dairy science*, 95(3), 1119-1127. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4817>
- [50] Braun, S., Ilberg, V., Blum, U., & Langowski, H. C. (2020). Nanosilver in dairy applications—antimicrobial effects on *Streptococcus thermophilus* and chemical interactions. *International Journal of Dairy Technology*, 73(2), 376-383. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12686>
- [51] Mikiciuk, J., Mikiciuk, E., Wrońska, A., & Szerk, A. (2016). Antimicrobial potential of commercial silver nanoparticles and the characterization of their physical properties toward probiotic bacteria isolated from fermented milk products. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 51(4), 222-229. <https://doi.org/10.1080/03601234.2015.1120614>
- [52] Sonohara, R., Muramatsu, N., Ohshima, H., & Kondo, T. (1995). Difference in surface properties between *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* as revealed by electrophoretic mobility measurements. *Biophysical chemistry*, 55(3), 273-277. [https://doi.org/10.1016/0301-4622\(95\)00004-h](https://doi.org/10.1016/0301-4622(95)00004-h)
- [53] Kim, I., Viswanathan, K., Kasi, G., Thanakkasaranee, S., Sadeghi, K., & Seo, J. (2022). ZnO nanostructures in active antibacterial food packaging: preparation methods, antimicrobial mechanisms, safety issues, future prospects, and challenges. *Food Reviews International*, 38(4), 537-565. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1737709>
- [44] Hossain, Md Mokter, Young Sun Mok, and Sarah Wu. "Investigation of silver nanoparticle synthesis with various nonthermal plasma reactor configurations." *Arabian Journal of Chemistry* 16.10 (2023): 105174. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2023.105174>
- [45] Nguyen, N. P. U., Dang, N. T., Doan, L., & Nguyen, T. T. H. (2023). Synthesis of silver nanoparticles: from conventional to 'modern' methods—a review. *Processes*, 11(9), 2617. <https://doi.org/10.3390/pr11092617>
- [46] HOANG, N. H., NGUYEN, T. T., & NGUYEN, T. M. D. (2023). Impact of microwave synthesis time on the shape of silver nanostructures and their antibacterial activity. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 33(1), 101-106. <https://doi.org/10.55713/jmmm.v33i1.1631>
- [47] Mudhafar, M., Zainol, I., Ameer, A. J., Abd, M. Y., Alsailawi, H. A., Ghazaly, N. M., ... & Zorah, M. (2024). The effect of fish collagen on the silver nanoparticles sizes and shapes using modified microwave-assisted green synthesis method and their antibacterial activities. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32837>
- [48] Kalaiselvi, A., Gantz, S., & Ramalingam, C. (2013). Effects of silver nanoparticles on storage stability of raw milk. *Int J Pharm Pharm Sci*, 5(274), e7.

approach. *Bulletin of Materials Science*, 43, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12034-019-1986-y>

[60] Talebian, N., Amininezhad, S. M., & Doudi, M. (2013). Controllable synthesis of ZnO nanoparticles and their morphology-dependent antibacterial and optical properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 120, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.01.004>

[61] Prasert, A., Sontikaew, S., Sriprapai, D., & Chuangchote, S. (2020). Polypropylene/ZnO nanocomposites: Mechanical properties, photocatalytic dye degradation, and antibacterial property. *Materials*, 13(4), 914. <https://doi.org/10.3390/ma13040914>

[62] Kupińska, K., Michalik, M., Krajenta, J., Bielicka, M., Markiewicz, K. H., Kalska-Szostko, B., & Wilczewska, A. Z. (2023). An in-situ fabrication method of ZnO and Other Zn (II) compounds containing polypropylene composites. *International journal of molecular sciences*, 24(3), 2357. <https://doi.org/10.3390/ijms24032357>

[63] Silvestre, C., Duraccio, D., Marra, A., Strongone, V., & Cimmino, S. (2016). Development of antibacterial composite films based on isotactic polypropylene and coated ZnO particles for active food packaging. *Coatings*, 6(1), 4. <https://doi.org/10.3390/coatings6010004>

[64] Mania, S., Cieślak, M., Konzorski, M., Świącikowski, P., Nelson, A., Banach, A., & Tylingo, R. (2020). The synergistic microbiological effects of industrial produced packaging polyethylene films incorporated with zinc nanoparticles. *Polymers*, 12(5), 1198. <https://doi.org/10.3390/polym12051198>

[54] Vijayaram, S., Razafindralambo, H., Sun, Y. Z., Vasantharaj, S., Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., & Raeeszadeh, M. (2024). Applications of green synthesized metal nanoparticles—a review. *Biological Trace Element Research*, 202(1), 360-386. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03645-9>

[55] Motelica, L., Vasile, B. S., Ficai, A., Surdu, A. V., Ficai, D., Oprea, O. C., ... & Dobre, A. A. (2023). Antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles loaded with essential oils. *Pharmaceutics*, 15(10), 2470. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15102470>

[56] Droepenu, E. K., Wee, B. S., Chin, S. F., Kok, K. Y., & Maligan, M. F. (2022). Zinc oxide nanoparticles synthesis methods and its effect on morphology: A review. *Biointerface Res. Appl. Chem*, 12, 4261-4292. <https://doi.org/10.33263/BRIAC123.42614292>

[57] Zhou, X. Q., Hayat, Z., Zhang, D. D., Li, M. Y., Hu, S., Wu, Q., ... & Yuan, Y. (2023). Zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization, modification, and applications in food and agriculture. *Processes*, 11(4), 1193. <https://doi.org/10.3390/pr11041193>

[58] Mohan, S.; Vellakkat, M.; Aravind, A.; Rekha, U. Hydrothermal synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles of various shapes under different reaction conditions. *Nano Express* 2020, 1-25, <https://doi.org/10.1088/2632-959X/abc813>

[59] Sharma, S., Kumar, K., Thakur, N., Chauhan, S., & Chauhan, M. S. (2020). The effect of shape and size of ZnO nanoparticles on their antimicrobial and photocatalytic activities: a green



extensive review. *Foods*, 9(11), 1628.
<https://doi.org/10.3390/foods9111628>

[72] Ligaj, M., Tichoniuk, M., Cierpiszewski, R., & Foltynowicz, Z. (2020). Efficiency of novel antimicrobial coating based on iron nanoparticles for dairy products' packaging. *Coatings*, 10(2), 156.

<https://doi.org/10.3390/coatings10020156>

[73] Mira's Laboratory with Miracle Box:
<https://miraskitchen.com.au/>

[74] Mackevica, A., Olsson, M. E., & Hansen, S. F. (2016). Silver nanoparticle release from commercially available plastic food containers into food simulants. *Journal of Nanoparticle Research*, 18, 1-11.
<https://doi.org/10.1007/s11051-015-3313-x>

[75] Santillán-Urquiza, E., Méndez-Rojas, M. Á., & Vélez-Ruiz, J. F. (2017).

Fortification of yogurt with nano and micro sized calcium, iron and zinc, effect on the physicochemical and rheological properties. *Lwt*, 80, 462-469.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.025>

[76] El-Sayed, H. S., El-Sayed, S. M., & Youssef, A. M. (2021). Novel approach for biosynthesizing of zinc oxide nanoparticles using *Lactobacillus gasseri* and their influence on microbiological, chemical, sensory properties of integrated yogurt. *Food Chemistry*, 365, 130513.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130513>

[77] Peighambari, S. H., Davarani, A. K., & Fasihnia, S. H. (2024). Effect of active antimicrobial films on quality parameters and shelf-life of fresh yufka dough. *Heliyon*, 10(4).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25972>

[65] Darvish, M., & Aji, A. (2021). Effect of polyethylene film thickness on the antimicrobial activity of embedded zinc oxide nanoparticles. *ACS omega*, 6(40), 26201-26209.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03223>

[66] Motelica, L., Fikai, D., Oprea, O.-C., Fikai, A., Ene, V.-L., Vasile, B.-S., Andronescu, E., & Holban, A.-M. (2021). Antibacterial biodegradable films based on alginate with silver nanoparticles and lemongrass essential oil—innovative packaging for cheese. *Nanomaterials*, 11(9), 2377.

<https://doi.org/10.3390/nano11092377>

[67] Fadji, T., Rashvand, M., Daramola, M. O., & Iwarere, S. A. (2023). A review on antimicrobial packaging for extending the shelf life of food. *Processes*, 11(2), 590.

<https://doi.org/10.3390/pr11020590>

[68] Küçük, G. S., Çelik, Ö. F., Mazi, B. G., & Türe, H. (2020). Evaluation of alginate and zein films as a carrier of natamycin to increase the shelf life of kashar cheese. *Packaging Technology and Science*, 33(1), 39-48.

<http://doi.org/10.1002/pts.2483>

[69] Beigmohammadi, F., Peighambari, S. H., Hesari, J., Azadmard-Damirchi, S., Peighambari, S. J., & Khosrowshahi, N. K. (2016). Antibacterial properties of LDPE nanocomposite films in packaging of UF cheese. *LWT-Food Science and Technology*, 65, 106-111.

<http://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.059>

[70] CTi's new dairy technology:
<https://cvatinfo.com/>

[71] Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., & Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An



[78] Yaghoubi, M., Alirezalu, K., Mazloomi, S. M., Marcinkowska-Lesiak, M., Azadmard-Damirchi, S., Peighambardoust, S. H., Hesari, J., Rastgoo, A., Phimolsiripol, Y., & Khaneghah, A. M. (2024). Enhancing beef sausage packaging with calcium alginate active film infused with nisin and ϵ -polylysine nanoparticles and beetroot extract. *Lwt*, *191*, 115665. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115665>

[79] Zanetti, M., Carniel, T. K., Dalcanton, F., dos Anjos, R. S., Riella, H. G., de Araújo, P. H., de Oliveira, D., & Fiori, M. A. (2018). Use of encapsulated natural compounds as antimicrobial additives in food packaging: A brief review. *Trends in Food Science & Technology*, *81*, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.003>

[80] Mohebi, E., Abbasvali, M., & Shahbazi, Y. (2023). Development of biomaterials based on chitosan-gelatin nanofibers encapsulated with Ziziphora clinopodioides essential oil and Heracleum persicum extract for extending the shelf-life of vacuum-cooked beef sausages. *International Journal of Biological Macromolecules*, *253*, 127258. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127258>



A review of nanotechnology-based solutions for increasing the quality of dairy products

Fariba Shafiei, Narges Nikoofard*, Hossein Nikoofard

Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan, Iran

ABSTRACT

Exposure to contamination with a wide range of spoilage microorganisms causes significant losses in dairy products. Also, increasing the quality and improving the taste of dairy products are issues of concern in society and industry. Thermal methods including pasteurization and sterilization are highly effective in inactivating spoilage microorganisms, but in some cases they cause color, taste and nutrient loss. In addition, solutions against recontamination of dairy products are needed. To solve or reduce these problems, nanotechnology has provided alternative or complementary methods in recent years. In this article, a review of non-thermal technologies such as cold plasma and nanobubbles and their applications in the field of dairy products is given. Non-thermal technologies process milk in a short time and at low temperatures. In this regard, they cause minimal or no change in taste and essential nutrients. The use of active packaging with antibacterial nanostructures is of interest to prevent secondary contamination and bacterial growth. In this paper, the antibacterial properties of silver and zinc oxide nanoparticles in inactivating microbes are reviewed. Then, their use in packaging on a research and industrial scale to extend the shelf life of dairy products is considered.

Keywords: Dairy products, cold plasma, nanobubbles, active packaging, antibacterial nanostructures. adsorption, advanced oxidation, drug delivery, sensor