دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

بسته بندی مواد غذایی با پلیمر های طبیعی به روش الکتروریسی

شیوا رضایی(نویسنده مسول)[1]، محمود توکلی[2]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه زابل، زابل shivarezawi8897@gmail.com

[2] استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه زابل، زابل mtavakoli@uoz.ac.ir

چکیده

پیشینه: مواد غذایی مستعد فساد میکروبی هستند، به همین خاطر توسعه روش‌های مناسب، سریع و کم هزینه به منظور جلوگیری از فساد در تمامی مراحل بسته بندی، انبارداری، حمل و نقل، توزیع و نگهداری تا زمان مصرف بسیار مورد نیاز است. بسته‌بندی فعال می‌تواند کیفیت غذا را از زمان تولید تا توزیع و مصرف بهبود بخشد .

این تحقیق با هدف ساخت پوشش هایی زیست تخریب پذیر از پلیمر های متنوع با روش الکتروریسی به منظور جلوگیری از فساد مواد غذایی در مراحل بسته بندی صورت می گیرد.

روش ها: ما یک تحقیق گسترده با استفاده از پایگاه های اطلاعاتی مرکز سیویلیکا، انجام جستجو های google scholar ، Elsevier ، connect ، web of Science درباره این موضوع انجام دادیم.

نتیجه گیری: استفاده از پلیمر های طبیعی با نانو الیاف به روش الکتروریسی باعث ایجاد نسل جدیدی از مواد بسته بندی سازگار با محیط زیست با مزایایی مانند زیست سازگاری، زیست تخریب پذیری و هزینه رقابتی شده است و بسیاری از انواع مختلف عوامل ضدمیکروبی طبیعی و یا مصنوعی را می توان در نانوالیاف الکتروریسی شده مانند اسانس، پپتیدهای ضد میکروبی، عصاره های گیاهی و نانوذرات معدنی گنجاند. این امر امکان آماده سازی مواد بسته بندی فعال را فراهم می کند که در برابر طیف وسیعی از میکروارگانیسم های بیماری زا موثر هستند.

کلمات کلیدی: بسته بندی، الکتروریسی، پلیمر های طبیعی، نانوالیاف، فساد

مقدمه

در چند سال اخیر، بروز بیماری های ناشی از غذا در کشور به طور قابل توجهی افزایش یافته است. بنابراین پیشگیری و کنترل آلودگی مواد غذایی یکی از راهکارهای موثر در کاهش ابتلا به بیماری های منتقله از راه غذا می باشد. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، در سال 2010 حدود 600 میلیون نفر در سراسر جهان ازبیماری های ناشی از غذا رنج می برند که تقریباً یک نفر از هر 10 جمعیت جهان است و باعث مرگ 420000 نفر شده است. فناوری بسته بندی مواد غذایی نقشی حیاتی در حفاظت از کیفیت، تازگی و ارزش غذایی محصولات غذایی ایفا می کند، بنابراین به طور موثرماندگاری مواد غذایی را در طول زنجیره تامین مواد غذایی افزایش می دهد[20].

افزایش تقاضا برای کیفیت مواد غذایی و ایمنی مواد غذایی، توسعه استراتژی های بسته بندی کارآمد برای افزایش عمر مفید مواد غذایی ضروری است[20]. امروزه مصرف کنندگان و صنایع غذایی تقاضای غذایی دارند که فاقد مواد نگهدارنده مصنوعی باشد.کپسوله سازی فرآیندی است که اجزای فعال را در یک ماتریس کپسوله کننده ترکیب می کند. می توان از آن برای پوشاندن طعم ها، بهبود حلالیت، افزایش سازگاری با ماتریس های غذایی، به حداکثر رساندن کارایی اسانس ها، تسهیل ذخیره سازی همراه با استفاده، و تأخیردر تجزیه شیمیایی اسانس ها استفاده کرد[36].

الکتروریسی یک روش کپسوله سازی است به دلیل سادگی، هزینه های تولید پایین، انعطاف پذیری و سهولت افزایش مقیاس شناخته شده است. این یک تکنیک ارجح برای تولید الیاف با اندازه 10-1000 نانومتر است. الیاف الکتروریسی می توانند حلالیت یا پراکندگی عوامل فعال آبگریز را بهبود بخشند، کارایی کپسولاسیون را افزایش دهند و پایداری جزء فعال را افزایش دهند. علاوه بر این، الیاف الکترواسپون می توانند آزادسازی کنترل شده را تحریک کنند، فراهمی زیستی را افزایش داده و به کپسوله کردن ترکیبات حساس به گرما کمک کنند[36]. مواد بسته بندی با لایه های پلیمری ضد میکروبی پوشانده شده اند تااز فساد و از بین بردن میکروارگانیسم های بیماری زا جلوگیری کنند، اگرچه سطح کم در دسترس آن ها باعث کاهش فعالیت زیستی آنها می شود. به همین دلیل، مواد الیافی، مانندتشک های الیافی الکتروریسی شده با قطر زیر میکرون (100 تا 300 نانومتر) و سطح فوق العاده بالا، برای این کاربرد مناسب تر هستند. ثابت شده است که الکتروریسی روشی مناسب برای ساخت تشک های نانوالیاف سه بعدی و کاربردی از طریق بی حرکتی کپسوله سازی مواد مناسب در ماتریس است. بنابراین، الیاف الکتروریسی شده با عوامل ضد میکروبی گنجانده شده می توانند باکتری ها را از بین ببرند و یا رشد آن ها را در سطح غذاها به عنوان ماده بسته بندی مهار کنند، بنابراین به تولید محصولات غذایی جدید و سالم تر کمک می کنند[35].

بسته بندی موادغذایی عمدتاً پیرامون مواد مصنوعی یا نیمه مصنوعی مانند پلی اتیلن، که معمولاً به عنوان پلاستیک یا پلاستیک یکبار مصرف شناخته می شود، توسعه یافته است. مدیریت نادرست و استفاده از پلاستیک های یکبار مصرف در بخش مواد غذایی افزایش یافته است و تأثیر بسیار مضری بر محیط زیست داشته است. اکثر دوستداران محیط زیست نگران افزایش آلودگی پلاستیکی تولید شده توسط صنایع غذایی هستند. از 70 سال گذشته، مشخص شده است که حدود 8 میلیارد تن پلاستیک تولید شده است و پیش بینی می شود که این تعداد در دو سال آینده 13 درصدافزایش یابد. مواد پلاستیکی تاثیر مستقیمی بر محیط زیست و سلامت انسان دارند. از آنجایی که زیست تخریب ناپذیراست، در محیط و داخل بدن انسان تجمع می یابد و عوارض زیادی ایجاد می کند[12].

نانوالیاف الکتروریسی شده دارای مزایای قابل توجهی از جمله ساده و مقرون به صرفه، نسبت سطح به حجم بالا، تخلخل بیشتر، تولید الیاف دارای خواص ساختاری و عملکردی مختلف، امکان انجام در دمای اتاق به منظور جلوگیری از تجزیه شیمیایی یا تبخیر مواد فعال زیستی مفید است در نتیجه کارایی و قدرت کپسولاسیون را افزایش می دهد و جذابیت بیشتری در صنایع غذایی دارد[25].

1.پلیمر

پلیمرهای زیستی ساختارهای بلند و منشعب کووالانسی هستند که از یک یاچند واحد مونومر تشکیل شده اند. هر مونومر دارای یک ویژگی منحصر به فرد مانند بار یونی و قطبیت است .پلیمرهای طبیعی مشتق شده از طبیعت در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می گیرند. از این پلیمرها می توان به عنوان فیلم، پوشش، بسته بندی یا موانع محافظ و نگهدارنده استفاده کرد. بقایای زیست توده کشاورزی مانند زئین، سویا، سلولز و نشاسته. پلیمرهای طبیعی حیوانی مانند کلاژن، ژلاتین و بقایای فرآوری مواد غذایی دریایی مانند کیتوزان، کیتین در صنایع غذایی استفاده شده است[3]. پلیمرهای به دست آمده به طور طبیعی در تعیین عملکرد (طعم، تجزیه پذیری زیستی) که قرار است به صورت فیلم یاپوشش به غذا منتقل شود، خاص هستند. پلیمرهای زیست تخریب پذیر طبیعی از ضایعات کشاورزی یا دریایی، گیاهان یا حیوانات برای جایگزینی پلاستیک غیرقابل تجزیه معمولی مورد استفاده برای بسته بندی مواد غذایی استفاده شده است[4]. فرآیندهای بسته بندی مواد غذایی به دست آمده از هیدروکلوئیدها به دلیل خاصیت بازدارندگی و انتقال جرم عالی، به طورگسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند، به همین دلیل می توان با افزایش عمر ماندگاری محصول، فساد آن را به تاخیر انداخت. علاوه بر این، پلی پپتیدها دارای قدرت و عملکرد ضد میکروبی بالاتری هستند[5]. ماهیت خوراکی این لایه ها می تواند با استفاده از فیلم های پلیمری کامپوزیتی یا فیلم های زیست فعال که ممکن است در رساندن ویتامین ها یا داروها کمک کند، افزایش جذب مواد مغذی را بیشتر تضمین کند[6]. در میان عصاره های گیاهی، اسانس رزماری یک عامل ضد میکروبی موثر در برابر چندین گونه باکتری و قارچ است[20]. نانوتکنولوژی توانسته است مواد نگهدارنده، رنگ یا عطر را از طریق نانوذرات اضافه کند و فعالیت ضد میکروبی، توانایی های فیزیکی و انتقال را افزایش داده و عوامل بیماری زا را شناسایی کند[12].

2.پلیمرهای خوراکی

ازپلیمرهای خوراکی می توان به مواد پلیمری اشاره کرد که در این عرصه به راحتی قابل بلعیده شدن و بدون عوارض جانبی بر مصرف کننده هستند. پلیمرهای طبیعی بسیار مورد توجه هستند. هنگامی که در بسته بندی استفاده می شود، از غذادر برابر از دست دادن مواد مغذی محافظت می کند، خواص حمل و نقل انبوه ترکیب مولکولی غذا را از داخل به خارج کنترل می کند و تغییرات نامطلوب محصول را کاهش می دهد. برای این منظور، پوشش ها را می توان با پاشیدن، غوطه ور کردن یا تشکیل فیلم روی سطح غذا انجام داد پلیمرهای بیولوژیکی را می توان از منابعی مانند گیاهان، حیوانات، میکروبی و بسیاری دیگر به دست آورد[7].

1.2.زئین

یک پروتئین پرولامین است (یعنی محتوای بالایی از پرولین و گلوتامین دارد) که به وفور در ذرت وجود دارد .عمدتاً از اسید گلوتامیک، لوسین، پرولین و آلانین تشکیل شده است. وجود آمینو اسیدهای غیر قطبی به آبگریزی آن نسبت داده می شود. ماهیت آبگریز زئین به به دام انداختن ترکیبات آبگریز کمک می کند که آن را کاندید خوبی برای تحویل ترکیبات زیست فعال می کند[8].

2.2.سویا

پروتئینی است که از سویا به دست می آید. حبوباتی که به طور گسترده در آسیا به عنوان منبع پروتئین مصرف می شود .پروتئین سویا از گلیسینین و بتا-کنگلیسینین تشکیل شده است و یک منبع مفید پروتئین است زیرا از تمام اسیدهای آمینه ضروری تشکیل شده است

که نمی توانند به صورت درون زا سنتز شوند. پروتئین سویا عمدتاً در خالص سازی استفاده می شودفرم،ایزوله پروتئین سویا. پپتیدهای زیست فعال در پروتئین های سویا برای افزایش اثربخشی محصول از طریق تخمیر، هیدرولیزو اتصال عرضی اصلاح می شوند[9].

3.2.سلولز

فراوان ترین زیست توده موجود است. این یک پلیمر زیستی کریستالی است که عمدتاً از گیاهان چوبی با وزن مولکولی حدود 450-500 کیلو دالتون به دست می آید. سلولز از بلوک های گلوکوپیرانوز متعددی تشکیل شده است که از طریق پیوندهای گلیکوزیدی متصل شده اند. مشتقات سلولزی مانند هیدروکسی پروپیل سلولز (HPC) ، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC) ،متیل سلولز (MC) و کربوکسی متیل سلولز (CMC) در پوشش ها و فیلم های خوراکی استفاده می شوند. سلولز و مشتقات آن هنگام گرم شدن ژل تشکیل می دهند و تحت ژلاسیون حرارتی برگشت پذیر قرار می گیرند. فیلم های سلولزی انعطاف پذیر، مقاوم در برابرچربی، محلول در آب، شفاف، بی مزه و دارای مانع انتقال اکسیژن است. سلولز میکروکریستالی و پودری به عنوان پرکننده در قرص های دارویی و همچنین عامل ژل کننده و تثبیت کننده در مواد غذایی بسته بندی شده استفاده می شود[10].

4.2.نشاسته

نشاسته از آمیلوز(1/5٪) و آمیلوپکتین (4/5٪) تشکیل شده است که بیشتر از برنج، گندم، تاپیوکا و سیب زمینی تولید می شوند.آمیلوز عمدتاً از طریق آلفا گلوکان(4 → 1) متصل است، در حالی که آمیلوپکتین دارای انشعابات متعدد از طریق پیوندهای آلفا (6→1) است. وزن مولکولی آمیلوز و آمیلوپکتین بین 150-400 کیلو دالتون و 10000-15000 کیلو دالتون متغیر است. پلیمرهای مبتنی بر نشاسته را می توان با پلیمرهای پلاستیکی به دلیل بی معطربودن، شفاف بودن، بی طعم بودن، نیمه تراوا در برابر CO مقایسه کرد، مقاوم در برابر O2و از نظر بیولوژیکی قابل جذب است[11].

5.2.کلاژن

پلیمری متشکل از همو، هترو-تریمرهایی است که توسط زنجیره های α پلی پپتیدی ساخته می شوند .تشکیل یک ساختار مارپیچ سه گانه، با وزن مولکولی در حدود 340-360 کیلو دالتون. این پروتئین فیبری اصلی است که در ماتریکس خارج سلولی حیوان، عمدتاً در غضروف، پوست یا تاندون ها یافت می شود .کلاژن بیشتر از پستانداران (گاو، خوک،بز و پرندگان) و غیر پستانداران (قورباغه ها و ماهی ها) گرفته می شود. از آنجایی که آبگریز است، می تواند تحت هیدرولیز چند مرحله ای قرار گیرد تا هیدروکلوئیدی تشکیل دهد که دارای خواص لایه سازی است.تحت شرایط اسیدی یا قلیایی، کلاژن می تواند برای تولید ژلاتین نوع A یا B هیدرولیز شود[12].

6.2.ژلاتین

کلاژن هیدرولیز شده شکل دیگری از پلیمر به نام ژلاتین را با محتوای اسید آمینه متغیر تولید می کند که پتانسیل ژل شدن و ویسکوزیته آن را تغییر می دهد. از این جهت عجیب است که یک ترکیب برگشت پذیر حرارتی را تشکیل می دهدکه در اطراف دمای بدن ذوب می شود، که در آشپزی از اهمیت کلیدی برخوردار است[7]. از آن برای کپسوله کردن موادغذایی با رطوبت کم یا در فاز روغن استفاده می شود. این نوع کپسوله سازی ضمن تعیین دوز یک ترکیب خاص، در برابراکسیژن و نور محافظت می کند[13].

7.2.کیتوزان

کیتوزان یک بتا دی گلوکان(2-آمینو-2-دئوکسی1→4) است که از استیل زدایی کیتین به دست می آید. وزن مولکولی کیتوزان از 100 تا 500 کیلو دالتون متغیر است. به عنوان یک پلیمر زیست تخریب پذیر غیر سمی، زیست سازگاری خوبی دارد و فعالیت ضد باکتریایی در برابر انواع پاتوژن ها از خود نشان می دهد. کیتوزان دارای ویژگی های فیلم سازی خوبی است که امکان تولید فیلم هایی با انتقال گاز کم (O_2وH_2O) را فراهم می کند. کیتوزان همچنین در روش های تحویل دارو بر اساس بسته بندی مواد غذایی استفاده می شود[14].کیتوزان عمدتاً برای بازیابی ضایعات حاصل از دور ریختن واحدهای فرآوری مواد غذایی، محافظت از مواد غذایی در برابر آلودگی میکروبی، شفافیت و تصفیه آب، و اسید زدایی آب میوه ها استفاده می شود[15].

3.فساد مواد غذایی

زمانی که یک ماده غذایی دچار تغییراتی شود یا واکنش های شیمیایی در آن به وقوع بپیوندد، به طوری که ارزش مصرفی آن کاملا پایین آمده یا از بین برود، در این صورت چنین ماده غذایی را فاسد می نامند. میکروارگانیسم ها سطوح مواد غذایی را از طریق خاک، آب و هوا آلوده میکنند. علاوه بر این، پلیمرهای زیستی موجود در غذاها مانند پروتئین، پلی ساکاریدها ولیپیدها به عنوان مواد مغذی مورد نیاز برای رشد و تولیدمثل میکروارگانیسم ها مصرف وتجزیه می شوند و در نهایت باعث فساد مواد غذایی و ایجاد خطرات ایمنی برای انسان می شوند. با این حال، میکروارگانیسم های اصلی عامل فساد ارتباط نزدیکی با انواع مواد غذایی دارند. آلودگی میکروبی و اکسیداسیون مواد مغذی دو دلیل اصلی فساد مواد غذایی در طول دوره پردازش، ذخیره سازی، حمل و نقل و فروش است. به عنوان مثال، آب میوه های تازه، میوه های تازه بریده شده و برخی از سبزیجات به سرعت در معرض هوا تغییر رنگ می دهند،که می تواند به واکنش پیچیده قهوه ای شدن نسبت داده شود. در این میان، اکسیداسیون پلی فنل ها، پروتئین ها، اسیدهای آمینه و سایر موادمغذی نیز عامل اصلی تخریب آنهاست[16].

4.تشخیص آلودگی و فساد مواد غذایی

توسعه حسگرهای زیستی اغلب شامل استفاده از نانومواد‌ی است که بسیار حساس هستند و مواد دیگری نیز دارند ویژگی های متمایز این حسگرها به عنوان شاخصی عمل می کنند که توانایی شناسایی تفاوت های جزئی در مورد عوامل اکولوژیکی(دمای محیط، رطوبت، آلودگی میکروبی، فساد مواد غذایی) را دارند. نانوساختارهای مختلفی مانند لایه های نازک، نانومیله ها، نانوذرات و نانوالیاف برای استفاده بالقوه در حسگرهای زیستی در حال بررسی هستند. حسگرهای ایمنی نوری مبتنی بر لایه های نازک بسیار حساس هستند و توانایی تشخیص سریع آن برای تشخیص ترکیبات سلول های میکروبی استفاده شده است. مولکول های بیولوژیکی مانند آنتی بادی ها، آنتی ژن ها یا پروتئین ها روی لایه نازک در این حسگرهای ایمنی بی حرکت می شوند که سیگنالی را در پاسخ به تشخیص آنالیت هدف با استفاده از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی،ای کلای و استافیلو کوکوس اورئوس باکتری های فاسد کننده مواد غذایی تولید می کنند [17]. نانوتکنولوژی همچنین می تواند به شناسایی آنالیت های بیولوژیکی مضر مانند آفت کش ها، ویروس ها و سموم برای تضمین کیفیت غذا کمک کند. نانولوله کربنی و حسگرهای زیستی برای شناسایی میکروب ها، سموم بیولوژیکی و سایر محصولات ثانویه مشتق شده از غذا و نوشیدنی استفاده می شود. هنگامی که به سموم موجود در آب متصل می شود، آنتی بادی های سمی مرتبط با نانولوله ها تغییر قابل اندازه گیری در رسانایی ایجاد می کنند و بنابراین برای شناسایی سموم موجود در آب مورد استفاده قرار می گیرند[18].

5.مبانی الکتروریسی

دستگاه الکتروریسی اولیه از چهار قسمت تشکیل شده است: 1) منبع تغذیه ولتاژ بالا، 2) نازل های متصل به پمپ سرنگ، 3) یک اسپینر، 4) یک کلکتور رسانا جدا. در طول فرآیند الکتروریسی، محلول پلیمری از اسپینراکسترود شد تا به دلیل کشش سطحی یک افت معلق ایجاد کند. هنگامی که یک ولتاژ بالا اضافه می شود، افت معلق الکتریکی می شود و بارهای القایی روی سطح توزیع میشود. دافعه الکترواستاتیک بر کشش سطحی غلبه کرده و قطره را به مخروط تیلور تغییرداده و از یک جت باردار خارج می شود[19]. سپس قطره محلول پلیمری تحت یک حرکت کششی قرار می گیرد که منجر به تشکیل رشته های ظریف می شود. در نهایت، رزوه ها به سرعت جامد شدند و به صورت الیاف در آمدندو روی کلکتور زمینی قرار گرفتند. نکته قابل توجه این است که سرعت جریان و ولتاژاعمالی نیروهای غیر مستقیمی هستند که در تشکیل مخروط تیلور نقش دارند .علاوه بر این دو عامل، تنظیم ویسکوزیته، غلظت، نوع، رسانایی الکتریکی، کشش سطحی وحلال محلول های پلیمری و همچنین فاصله بین اسپینر و کلکتور در طول فرآیند الکتروریسی برای به دست آوردن نانوالیاف همگن و فوق ریز ضروری است[20]. اسانس های تجاری و مرکباتی مانند رزماری، لورل، آویشن، مریم گلی، آفتابگردان، کلزا، ذرت،زیتون، پرتقال و لیمو می توانند به طور موثری برای بهبود ماندگاری گوشت ماهی مورد استفاده قرار گیرند([21].

6.انواع الکتروریسی برای بسته بندی مواد غذایی فعال

الکتروریسی را می توان با توجه به تعداد و ساختار نازل های سرنگ و همچنین ویژگی های ترکیبات فعال کپسوله شده به چهار نوع تقسیم کرد.: 1) الکتروریسی ترکیبی 2) الکتروریسی حامل ثانویه 3) الکتروریسی کواکسیال 4) الکتروریسی امولسیون[22].

1.6.الکتروریسی ترکیبی

ساده ترین و رایج ترین روش است. برای بسته بندی مواد غذایی فعال، ترکیبات فعال مختلف به طور مستقیم در یک یا چند محلول پلیمری پراکنده می شوند تا از طریق مخلوط کردن الکتروریسی با استفاده از سوزن سرنگ، سیستم رهایش پایدار به دست آید. الکتروریسی حامل ثانویه که با ترکیب داروها در نانوحامل های متنوع و متعاقباً در محلول پلیمری برای الکتروریسی پراکنده می شود، آزادسازی چند دارو را به دست می آورد[23]. با توجه به تحقیقات قبلی، ترکیبات زیست فعال را می توان در سیکلودکسترین کپسوله کرد تا کمپلکس ها را تشکیل دهند و متعاقباً به نانوالیاف پلیمری الکتروریسی شوند. که حفاظت مکرری را برای مولکول های فعال زیستی به دست آورد. با این حال، این سیستم الکتروریسی در مقایسه با الکتروریسی ترکیبی پیچیده است[24].

2.6.الکتروریسی کواکسیال

یک رویکرد ساده در حال ظهور برای تولید نانوالیاف پوسته هسته از طریق دو مویرگ هم محور است که هسته، غلاف و نانوالیاف توخالی با ابعاد قابل کنترل را می توان با چرخاندن دو مایع غیرقابل اختلاط از طریق یک اسپینر کواکسیال و دو مویرگی تولید کرد .به طور معمول، دو مایع چسبناک از طریق مویرگ های داخلی و خارجی منتقل می شوند وسپس یک مخروط تیلور مرکب و یک جت کواکسیال پایدار تحت ولتاژ بالا تشکیل می دهند. جت کواکسیال توسط نیروهای الکترواستاتیک برای ساخت هسته، غلاف یا نانوالیاف توخالی کشیده شد[20].

3.6.الکتروریسی حامل ثانویه

سیالات غیر قابل امتزاج (فازهای نفتی و آبی) به یک محلول همگن امولسیون می شوند و از طریق یک مویین به نانوالیاف ساختاری غلاف هسته ای الکتروریسی می شوند[25].

4.6.الکتروریسی امولسیونی

به پایداری و رفتار رئولوژیکی امولسیون ها بستگی دارد. نوع و غلظت امولسیفایرهای مورد استفاده نیز نقش حیاتی در الکتروریسی امولسیون در حین همگن سازی دارد. تاثیر امولسیفایرها در تشکیل پایدار امولسیون عمدتاً در دو جنبه منعکس می شود: 1) امولسیفایرها می توانند به سرعت سطح قطرات را جذب کنند، بنابراین کشش سطحی را کاهش داده و یک پوشش محافظ تشکیل می دهند. 2) امولسیفایرها می توانند از شکستن و ادغام قطرات جلوگیری کنند. به طور کلی،تشکیل نانوالیاف هسته-پوسته از طریق الکتروریسی امولسیونی را می توان به سه مرحله تقسیم کرد: 1) فاز قطره در امولسیفایرهای حلال با همزدن یا همگن سازی پراکنده می شود. 2) حلال نزدیک به سطح سریعتر از حلال مرکزی در طول فرآیند الکتروریسی تبخیر می شود. 3) قطرات امولسیون از سطح به مرکزحرکت کرده و تحت میدان الکتریکی ولتاژ بالا به شکل بیضوی کشیده شده و متعاقباً نانوالیاف هسته-پوسته بر روی کلکتور تشکیل می شوند[26].

7.نانوالیاف

نانوالیاف پلیمری را می توان با استفاده از تکنیک های مختلفی ساخت، اما رایج ترین و پرکاربرد ترین آنها، تکنیک الکتروریسی است. در مطالعه ای مشابه عصاره به نانوالیاف کیتوزان و پلی ونیل الکل با استفاده از تکنیک الکتروریسی و فعالیت ضد باکتریایی آن در برابراستافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیا کلی بررسی گردید[1]. نانوالیاف الکتروریسی شده را می توان از طیف متنوعی از پروتئین ها و پلی ساکاریدها، به صورت جداگانه یا ترکیبی ایجاد کرد، که ممکن است منجر به نسل جدیدی از مواد بسته بندی سازگار با محیط زیست با مزایایی مانند زیست سازگاری شود[2]. زیست تخریب پذیری و هزینه رقابتی علاوه بر این، بسیاری از انواع مختلف عوامل ضدمیکروبی طبیعی و یا مصنوعی را می توان در نانوالیاف الکتروریسی شده مانند اسانس، پپتیدهای ضد میکروبی، عصاره های گیاهی و نانوذرات معدنی گنجاند. این امر امکان آماده سازی مواد بسته بندی فعال را فراهم می کند که در برابر طیف وسیعی از میکروارگانیسم های فساد و بیماری زا موثر هستند[25].

8.ترکیبات فعال محصور شده در نانوالیاف

به منظور حفظ کیفیت و تازگی، ترکیبات فعال عملکردی متنوعی به طور گسترده برای نگهداری مواد غذایی انتخاب شدند، از جمله ضد میکروبی های طبیعی، ضد میکروبی های معدنی و ضد میکروبی های مصنوعی. نانوتکنولوژی الکتروریسی به عنوان مسیر موثر و امکان پذیر برای محصور کردن این ترکیبات فعال شناخته شده است. طبقه بندی و خصوصیات ترکیبات فعال، مبنایی را برای توسعه سیستم های بسته بندی فعال مناسب فراهم می کند[20].

1.8.عصاره گیاهی طبیعی

آلودگی باکتریایی یکی از مهم ترین چالش ها برای تازه سازی مواد غذایی است. در سال های اخیر، عصاره های گیاهی طبیعی در حفاظت از مواد غذایی توجه قابل توجهی رابه خود جلب کرده اند که می توان آن ها را به اسانس ها و ترکیبات فنلی مانند تیمول تقسیم کرد، لیمونن ، وانیلین، سیترال، سینامالدئید، کارواکرول، لینالول، اوژنول، پینن-a، ژرانیول، منتول، کورکومین، گالیک اسید، پلی فنول چای، آلفا توکوفرول، آلیل ایزوتیوسیونات[20].

2.8.ترکیبات فنلی

پلی فنل چای یک ترکیب فنولی ایمن است که از برگ های چای استخراج می شود با فعالیت های ضد باکتریایی و آنتی اکسیدانی عالی، به طور گسترده ای برای بسته بندی فعال استفاده می شود[28]. نانوالیاف پلی فنول نشاسته، چای به تازگی توسط الکتروریسی یک

مرحله ای با کمک دما بدون افزودن نرم کننده ها تهیه شده است. نانوالیاف نشاسته خواص آنتی اکسیدانی، مکانیکی و آبگریز را از طریق روش اتصال عرضی انجام دادند که کاربرد بالقوه ای در بسته بندی مواد غذایی داشت .استراتژی دیگری برای بسته بندی فعال، ایجاد یک فیلم دولایه بارگیری شده با-α توکوفرول از طریق روش های الکتروریسی، الکترواسپری با استفاده از ایزوله پروتئین آب پنیر، زین و پلیمرهای پروتئین سویا به عنوان مواد پوسته هیبریدی و فیلم گلوتن گندم به عنوان ماتریس بررسی شد. فیلم دولایه هیبریدی ثبات-α توکوفرول را بهبود بخشید و راندمان کپسولاسیون بالایی را انجام داد. این سیستم بسته بندی عملکرد طولانی مدت دارد[29].

ماندگاری محصولات مایع با اجتناب از اکسیدان لیپید، اسیدگالیک یک ترکیب فنلی است که بیشتر از پالماتوم و اکالیپتوس روبوستا استخراج می شود که دارای فعالیت های آنتی اکسیدانی، ضد باکتریایی، ضد التهابی و ضد سرطانی عالی است اما به دما، pH و نور حساس است. از این رو نانوالیاف ترکیبی هیدروکسی پروپیل متیل سلولز، پلی اتیلن اکسید را با الکتروریسی با اسید گالیک ایجاد کرد. ثابت شد که این فیلم نانوالیافی بیوپلیمری ترکیبی حاوی اسید گالیک دارای اثر آنتی اکسیدانی خوبی برای گردو است[30].

3.8.روغن های ضروری

اسانس ها مواد ضد باکتریایی با طیف گسترده و معمولی غیر تماسی هستند که می توانند به طور موثری از رشد باکتری ها، مخمرها و کپک ها جلوگیری کنند. عصاره های گیاهی طبیعی به ویژه اسانس ها بسیار حساس به دما و نور و همچنین بسیار فرار هستند. به این دلایل، تقاضای فوری برای توسعه سیستم های کارآمدتر برای حفاظت از اسانس های فرار وجود دارد. در طی پژوهشی کارواکرول را با موفقیت در نانوالیاف نشاسته سیب زمینی محلول از طریق تکنیک الکتروریسی کپسوله کرد. نانوالیاف غیر سمی به وضوح رشدS,L.MONOCYTOGENES را کاهش دادند[31].

ای کلای، تیفی موریوم و استافیلوکوکوس اورئوس تا 30 روز فعالیت ضد باکتریایی طولانی مدت را در برابر استافیلوکوکوس اورئوس حفظ کردند. در تحقیق دیگری اسانس پونه لانگفولیا از طریق الکتروریسی در نانوالیاف کربوکسی متیل سلولز-ژلاتین (GE-CMC) کپسوله شد. نانوالیاف خوراکی نه تنها کیفیت حسی(مانند بو، رنگ، بافت، طعم) میگوهای خام آب شیرین را بهبود می بخشد، بلکه ماندگاری میگوها را تا 14 روز افزایش می دهد. به جای افزودن عصاره های فرار گیاهی به طور مستقیم به محلول پلیمری برای الکتروریسی، ابتدا اوژنول رابه سیکلودکسترین کپسوله کرد.پایداری حرارتی را افزایش داده و آزادسازی اوژنول راطولانی تر می کند. و سپس مجموعه ای از کارهای مشابه نشان داد که کمپلکس های گنجاندن می توانند به طور موثرتری ماندگاری مواد غذایی را در مقایسه با کپسوله کردن مستقیم اسانس ها در نانوالیاف پلیمری افزایش دهند[32].

9.ترکیبات زیست فعال مبتنی بر پپتید و آنزیم

علاوه بر عصاره های گیاهی به عنوان ترکیبات زیست فعال بسیار موثر، نقش سایر مولکول های زیست فعال را نباید برای تهیه نانوالیاف بسته بندی کاربردی دست کم گرفت. نایسین محبوب ترین پروتئین ضد باکتری مبتنی بر میکروبی است که از34 اسید آمینه تشکیل شده است و ازلاکتوکوکوس لاکتیس نشات گرفته و به طور گسترده برای مهار پاتوژن های غذایی استفاده می شود. علاوه براین، نایسین به دلیل ایمنی زیستی مطلوب توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده توسطFDA تایید شده است. ایزوله پروتئین سویا فسفریله شده با نایسین، پلی (ال-لاکتیک اسید)/دی اکسید زیرکونیوم حاوی نایسین (Nisin-Pspi/Plla/Zro_2)به صورت نانوالیاف از طریق تکنیک الکتروریسی تهیه شد. این لایه نانوالیاف کامپوزیتی اجازه می دهد تا آزادسازی نایسین را طولانی تر کند. همچنین، افزودن PSPI ظرفیت جذب آب و نرخ تخریب لایه نانوالیاف (Pspi/Plla/Zro) را بهبود بخشید. با این حال فیلم نانو الیاف زمانی که محتوای PSPI به 25 درصد برسد تولید نانوالیاف Nisin دشوار می شود. در7 ساعت اولیه، یک رهاسازی انفجاری از نانوالیاف انجام داده شد و سرعت رهاسازی به تدریج تا رسیدن به تعادل افزایش یافت. رضایت بخش است که غشاهای نانوالیافی فعالیت ضد باکتریایی طولانی مدت و موثری را در

برابر، استافیلوکوکوس اورئوس داشت و فعالیت ضد باکتریایی با افزایش محتوای نایسین افزایش یافت. این فیلم کامپوزیت نانوالیافی را می توان برای کاربردهای پزشکی و بسته بندی مواد غذایی استفاده کرد[33]. در پژوهشی دیگر (نانوذرات پلی-γ-گلوتامیک اسید/کیتوزان) NGCحاوی نایسین را آماده کرد و در نانوالیاف پلی اتیلن اکسید PEO برای بسته بندی مواد غذایی جاسازی شد. با توجه به نتایج، در حالی که غلظت نایسین 5 میلی گرم بر میلی لیتر بود، نانوذرات NGC،پلی پراکندگی مطلوب، پتانسیل زتا، ظرفیت بارگذاری بالا و راندمان کپسوله سازی را نشان دادند. نانو الیاف PEO بارگذاری شده با نانوذرات NGC ،آنتی باکتریال رضایت بخشی را نشان داد[20].

1.9.نانوذرات مبتنی بر فلز

فلز و اکسید فلز به عنوان یکی از ضروری ترین مواد ضد میکروبی است. ازجمله نانو ذرات نقره (AgNps) ،زئین اکسید (Zno)، اکسید مس (Cuo) و دی اکسید تیتانیوم (Tioo)در زمینه بسته بندی پزشکی و مواد غذایی قابل توجه است. به طور کلی، این نانوذرات به عنوان عوامل ضد میکروبی یا جاذب اتیلن برای نگهداری مواد غذایی عمل می کنند[34]. با این حال، این نانوذرات به طور بالقوه از مواد بسته بندی به مواد غذایی منتقل می شوند که باعث نگرانی قابل توجهی برای سلامت انسان می شود. بنابراین، ترکیب این نانوذرات در نانوالیاف زیست پلیمری سازگار با محیط زیست است. مواد حامل متنوعی برای مقابله با فلزات و اکسیدهای فلزی برای بسته بندی مواد غذایی به وجود آمده اند. نانوذرات نقره (AgNps)را با موفقیت سنتز کردند و در نانوالیاف پلی وینیل الکل (PVA) برای بسته بندی ضد میکروبی قرار دادند. نکته جدید این کار این است که نانوذرات نقره از طریق یک مسیر سبز به دنبال مخلوط شدن با عصاره پوست میوه (کاریکا پاپایا، وسیترولوس لاناتوس) سنتز شدند. نتایج نشان داد که این غشای نانوفیبری زیست سازگار دارای فعالیت ضد میکروبی در برابر باسیلوس سرئوس،استافیلوکوکوس اورئوس،اشرشیاکلی، وسودوموناس آئروژینوزامی باشد. لیموها و توت فرنگی های پیچیده شده با نانوالیاف (AgPVA)اثر حفظ عالی را نشان دادند .با این حال، استفاده از نانوذرات تک فلزی به عنوان عوامل ضد باکتری ممکن است به اثر ضدباکتریایی مطلوبی دست پیدا نکند. ژان و نانوذرات نقره و اسید تانیک را به نانوالیاف اضافه کردند و با غوطه ور کردن نانوالیاف zein/TAدر محلول نیترات نقره برای تولید نانوذرات نقره در محل وارد کرد که فعالیت های آنتی اکسیدانی و ضدباکتریایی را به طور هم افزایی ارائه کرد و به طور قابل توجهی ماندگاری مواد غذایی را افزایش داد. علاوه بر این، مشخص شد که نانوالیاف zein/TA/ AgNPs توانایی کاهش کاتالیزوری خاصی دارند که در بسیاری از زمینه ها نوید بخش است[20].

10.نتیجه گیری

مواد بسته بندی با لایه های پلیمری ضد میکروبی پوشانده شده اند تااز فساد و از بین بردن میکروارگانیسم های بیماری زا جلوگیری کنند، اگرچه سطح کم در دسترس آن ها باعث کاهش فعالیت زیستی آنها می شود. به همین دلیل، مواد الیافی، مانندتشک های الیافی الکتروریسی شده با قطر زیر میکرون (100 تا 300 نانومتر) و سطح فوق العاده بالا، برای این کاربرد مناسب تر هستند. الکتروریسی روشی مناسب برای ساخت تشک های نانوالیاف سه بعدی و کاربردی از طریق بی حرکتی، کپسوله سازی مواد مناسب در ماتریس است بنابراین، الیاف الکتروریسی شده با عوامل ضد میکروبی گنجانده شده می توانند باکتری ها را از بین ببرند ویا رشد آن ها را در سطح غذاها به عنوان ماده بسته بندی مهار کنند.استفاده از پلیمر های طبیعی با نانو الیاف به روش الکتروریسی باعث ایجاد نسل جدیدی از مواد بسته بندی سازگار با محیط زیست با مزایایی مانند زیست سازگاری، زیست تخریب پذیری و هزینه رقابتی شده است و بسیاری از انواع مختلف عوامل ضدمیکروبی طبیعی و یا مصنوعی را می توان در نانوالیاف الکتروریسی شده مانند اسانس، پپتیدهای ضد میکروبی، عصاره های گیاهی و نانوذرات معدنی گنجاند. این امر امکان آماده سازی مواد بسته بندی فعال را فراهم می کند که در برابر طیف وسیعی از میکروارگانیسم های بیماری زا موثر هستند. بنابراین به تولید محصولات غذایی جدید و سالم تر کمک می کنند.

11.منابع

[1] موفق و همکاران 1397. استفاده از نانوالیاف حاصل از الکتروریسی زئین به عنوان نانوحامل وانکومایسین: بررسی ویژگیها، آزادسازی و خاصیت ضد میکروبی. مجله علوم و صنایع غذایی ایران. ۱۵ (۸۰) :۱۹۹-۲۱۲

[2] رحمتی نیا و همکاران 1400. نانوالیاف حاصل از الکتروریسی زئین به عنوان نانوحامل اسانس اکالیپتوس: بررسی ویژگی‌ها و خاصیت ضد میکروبی. مجله علوم و صنایع غذایی ایران. دوره ۱۸ ، شماره 121، ۹۱-۸۱

[3] Hanim, M. A. A., & Nuraini, A. A. (2022). Characterization of natural bionanocomposites polymers forfood packaging. In Bionanocomposites for Food Packaging Applications (pp. 69–90). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88528-7.00015-0

[4] Mangaraj S, Yadav A, Bal LM, Dash SK, Mahanti NK. Application of Biodegradable Polymers in Food Packaging Industry: A Comprehensive Review. Journal of Packaging Technology and Research. 2019;3(1):77-96. doi:10.1007/s41783-018-0049-y

[5] Zhang H, Zhang F, Yuan R. Applications of natural polymer-based hydrogels in the food industry. In: Hydrogels Based on Natural Polymers. Elsevier; 2020:357-410. doi:10.1016/B978-0-12-816421-1.00015-X

[6] Ansorena MR, Pereda M, Marcovich NE. Edible films. In: Polymers for Food Applications. Springer International Publishing; 2018:5-24. doi:10.1007/978-3-319-94625-2_2

[7] Shit SC, Shah PM. Edible Polymers: Challenges and Opportunities. Journal of Polymers. 2014;2014:1-13. doi:10.1155/2014/427259

[8] Glusac J, Fishman A. Enzymatic and chemical modification of zein for food application. Trends in Food Science & Technology. 2021;112:507-517. doi:10.1016/j.tifs.2021.04.024

[9] Subroto E, Abdillah M, Qonit H. Modification of soy protein for the production of bioactive peptides and their utilization. Article in International Journal of Scientific & Technology Research. 2020;9(2):3121- 513 3127. ISSN: 2277-8616

[10] Williams PA, Phillips GO. Introduction to food hydrocolloids. In: Handbook of Hydrocolloids. Elsevier; 2021:3-26. doi:10.1016/B978-0-12-820104-6.00017

[11] Sun J, Zhou W, Huang D, Yan L. 3D food printing: Perspectives. In: Polymers for Food Applications. Springer International Publishing; 2018:725-755. doi:10.1007/978-3-319-94625-2_26

[12] Gupta, I., Cherwoo, L., Bhatia, R., & Setia, H. (2022). Biopolymers: Implications and application in the food industry. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 102534.

[13] Khan MI, Adrees M, Rizwan Tariq M, Sohaib M. Application of edible coating for improving meat quality: a review. Pakistan Journal of Food Sciences. 2013;23(2):71-79. ISSN : 1605-2552

[14] Bonilla J, Fortunati E, Atarés L, Chiralt A, Kenny JM. Physical, structural and antimicrobial properties of poly vinyl alcohol–chitosan biodegradable films. Food Hydrocolloids. 2014;35:463-470. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.07.002

[15] Manigandan V, Karthik R, Ramachandran S, Rajagopal S. Chitosan Applications in Food Industry. In: Biopolymers for Food Design. Elsevier; 2018:469-491. doi:10.1016/B978-0-12-811449-0.00015-3

[16] Sun, X., Wang, J., Dong, M., Zhang, H., Li, L., & Wang, L. (2022). Food spoilage, bioactive food fresh-keeping films and functional edible coatings: Research status, existing problems and development trend. *Trends in Food Science & Technology*, *119*, 122-132.

[17] Singh T, Shukla S, Kumar P, Wahla V, Bajpai VK. Application of nanotechnology in food science: Perception and overview. Frontiers in Microbiology. 2017;8:1501. doi:10.3389/fmicb.2017.01501

[18] Tan F, Leung PHM, Liu Z bin, et al. A PDMS microfluidic impedance immunosensor for E. coli O157:H7 591 and Staphylococcus aureus detection via antibody-immobilized nanoporous membrane. Sensors and 592 Actuators B: Chemical. 2011;159(1):328-335. doi:10.1016/j.snb.2011.06.074

[19] Li, X., Xiao, N., Xiao, G., Bai, W., Zhang, X., & Zhao, W. (2021). Lemon essential oil/ vermiculite encapsulated in electrospun konjac glucomannan-grafted-poly (acrylic acid)/polyvinyl alcohol bacteriostatic pad: Sustained control release and its application in food preservation. Food Chemistry, 348, 129021–129030. https://doi. org/10.1016/j.foodchem.2021.129021

[20] Min, T., Zhou, L., Sun, X., Du, H., Zhu, Z., & Wen, Y. (2022). Electrospun functional polymeric nanofibers for active food packaging: A review. *Food Chemistry*, 133239.

[21] Yao, Z. C., Chang, M. W., Ahmad, Z., & Li, J. S. (2016). Encapsulation of rose hip seed oil into fibrous zein films for ambient and on demand food preservation via coaxial electrospinning. *Journal of food engineering*, *191*, 115-123.

[22] Feng, X., Li, J., Zhang, X., Liu, T., Ding, J., & Chen, X. (2019). Electrospun polymer micro/nanofibers as pharmaceutical repositories for healthcare. Journal of Controlled Release, 302, 19–41. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.03.020

[23] Ding, Y., Li, W., Zhang, F., Liu, Z., Zanjanizadeh Ezazi, N., Liu, D., & Santos, H. A. (2019). Electrospun fibrous architectures for drug delivery, tissue engineering and cancer therapy. Advanced Functional Materials, 29, 1802852. https://doi.org/10.1002/ adfm.201802852

[24] Chen, Y., Mensah, A., Wang, Q., Li, D., Qiu, Y., & Wei, Q. (2020). Hierarchical porous nanofibers containing thymol/beta-cyclodextrin: Physico-chemical characterization and potential biomedical applications. Materials Science and Engineering: C, 115, 111155–111163. https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111155

[25] Briggs, T., & Arinzeh, T. L. (2014). Examining the formulation of emulsion electrospinning for improving the release of bioactive proteins from electrospun fibers. Journal of Biomedical Materials Research, Part A, 102, 674–684. https://doi. org/10.1002/jbm.a.34730

[2\6] Zhang, C., Feng, F., & Zhang, H. (2018). Emulsion electrospinning: Fundamentals, food applications and prospects. Trends in Food Science & Technology, 80, 175–186. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.005

[27] Barajas-Álvarez, P., González-Ávila, M., & Espinosa-Andrews, H. (2021). Recent advances in probiotic encapsulation to improve viability under storage and gastrointestinal conditions and their impact on functional food formulation. *Food Reviews International*, 1-22.

[28] Zhang, D., Chen, L., Cai, J., Dong, Q., Din, Z. U., Hu, Z. Z., … Cheng, S. Y. (2021). Starch/ tea polyphenols nanofibrous films for food packaging application: From facile construction to enhance mechanical,

antioxidant and hydrophobic properties. Food Chemistry, 360, Article 129922. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129922

[29] Fabra, M. J., Lopez-Rubio, ´ A., & Lagaron, J. M. (2016). Use of the electrohydrodynamic process to develop active/bioactive bilayer films for food packaging applications. Food Hydrocolloids, 55, 11–18. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.10.026

[30] Aydogdu, A., Sumnu, G., & Sahin, S. (2019). Fabrication of gallic acid loaded hydroxypropyl methylcellulose nanofibers by electrospinning technique as active packaging material. Carbohydrate Polymers, 208, 241–250. https://doi.org/10.1016/ j.carbpol.2018.12.065

[31] Tiwari, B. K., Valdramidis, V. P., O'Donnell, C. P., Muthukumarappan, K., Bourke, P., & Cullen, P. J. (2009). Application of natural antimicrobials for food preservation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57, 5987–6000. https://doi.org/10.1021/ jf900668n

[32] Shahbazi, Y., Shavisi, N., Karami, N., Lorestani, R., & Dabirian, F. (2021). Electrospun carboxymethyl cellulose-gelatin nanofibrous films encapsulated with Mentha longifolia L. essential oil for active packaging of peeled giant freshwater prawn. LWT - Food Science and Technology, 152, Article 112322. https://doi.org/10.1016/j. lwt.2021.112322

[33] Cui, H., Wu, J., Li, C., & Lin, L. (2017). Improving anti-listeria activity of cheese packaging via nanofiber containing nisin-loaded nanoparticles. LWT - Food Science and Technology, 81, 233–242. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.003

[34] Garcia, C. V., Shin, G. H., & Kim, J. T. (2018). Metal oxide-based nanocomposites in food packaging: Applications, migration, and regulations. Trends in Food Science & Technology, 82, 21–31. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.021

[35] Alonso-González, M., Corral-González, A., Felix, M., Romero, A., & Martin-Alfonso, J. E. (2020). Developing active poly (vinyl alcohol)-based membranes with encapsulated antimicrobial enzymes via electrospinning for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, *162*, 913-921.

[36] Hosseini, F., Miri, M. A., Najafi, M., Soleimanifard, S., & Aran, M. (2021). Encapsulation of rosemary essential oil in zein by electrospinning technique. *Journal of Food Science*, *86*(9), 4070-4086.