یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

کاربرد نانوالیاف الکتروریسی شده در تولید بسته بندی فعال مواد غذایی

بهینا خزانی

دانشجوی کارشناسی ارشد ، علوم و مهندسی صنایع غذایی - گرایش شیمی مواد غذایی ، دانشگاه ارومیه ، ارومیه ، ایران

St_b.khazani@urmia.ac.ir , b.khazani.77@gmail.com

چکیده

بسته بندی مواد غذایی یک حوزه چند رشته ای است که شامل علوم غذایی ، مهندسی مواد غذایی ، شیمی مواد غذایی و میکروبیولوژی مواد غذایی است . بسته بندی مواد غذایی نقش مهمی را در حفاظت از ماده غذایی در طی فرآیندهای تولید ، کنترل ، ذخیره سازی ، نقل و انتقال و در نهایت تحویل آن به مشتری ایفا می کند. نوآوری در صنایع بسته بندی مواد غذایی ، موجب بهبود کیفیت و مشتری پسند شدن بسته بندی ها میشود. الکتروریسی یکی از روش های مناسب جهت سنتز الیاف پلیمری با قطر در اندازه نانو می باشد. زمانی که قطر الیاف پلیمری در حد نانومتر کاهش می یابد ، سطح ویژه آن و عملکرد مکانیکی و تخلخل این الیاف افزایش یافته و کاربرد آن را نیز افزایش می دهد. کاربرد نانوالیاف الکتروریسی شده به دلیل مزایای مساحت سطح بالا به حجم ، الیاف پیوسته در مقیاس نانو ، هزینه کم و تولید بسیار ساده ، سازگاری عالی برای طیف وسیعی از پلیمرها و قابلیت عملکردپذیری ، توجه زیادی را در صنایع غذایی به خود جلب کرده است. در اینجا انواع پلیمرها برای ساخت نانوالیاف الکتروریسی شده ، از جمله پلیمرهای طبیعی و پلیمرهای سنتتیک به صورت خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرند.

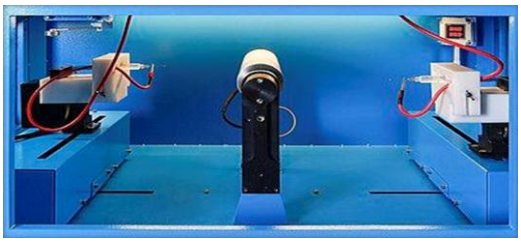
واژه‌های کلیدی

الکتروریسی ، نانوالیاف ، الکترواسپون ، بسته بندی مواد غذایی

۱. مقدمه

الکتروریسی فرایندی جهت تولید انواع نانوالیاف و میکروالیاف از محلول‌های مواد پلیمری، سرامیکی، فلزات، شیشه ای یا محلول‌های کامپوزیتی متشکل از پلیمر- نانوذرات و همچنین مذاب‌های مواد گفته شده می‌باشد. در روش الکتروریسی هم از مذاب و هم از محلول پلیمری می‌توان استفاده کرد. الکتروریسی را ریسندگی الکترواستاتیکی یا برق‌ریسی نیز مینامند. از این روش در محصور کردن ترکیبات زیست فعال، اسانس ها و .... استفاده می شود .

در روش الکتروریسی از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا جهت تولید بار الکتریکی در جریان محلول یا مذاب پلیمری استفاده می‌شود. به‌منظور تولید نانوالیاف، یکی از الکترودهای منبع تغذیه ولتاژ بالا به محلول پلیمری و الکترود دیگر به زمین یا به جمع‌کننده رسانا متصل می‌گردد. با عبور محلول از درون لوله موئینه، در اثر میدان الکتریکی حاصل از منبع تغذیه ولتاژ بالا مابین نوک لوله موئینه و جمع‌کننده متصل به زمین، سیال باردار شده و از نوک لوله موئینه به سمت جمع‌کننده کشیده می‌شود. در اثر حرکت سیال، حلال تبخیر شده و رشته‌هایی با قطر زیر میکرون بر روی جمع‌کننده تولید می گردد (شکل ۱) [1] . در برخی موارد، مهره‌هایی به جای الیاف در طول فرآیند الکتروریسی تشکیل می‌شود. الیافی که حاوی مهره است، الیاف مهره تسبیحی را تشکیل می‌دهند .



شکل ۱ . تجهیزات دستگاه الکتروریسی : پمپ سرنگی و غلطک جمع‌کننده

عوامل اثر گذار بر تولید الیاف الکتروریسی :

•خواص ذاتی محلول پلیمری نظیر نوع و وزن مولکولی پلیمر، قطبیت حلال، ویسکوزیته، الاستیسیته رسانایی و کشش سطحی محلول .

•عوامل فرآیندی، نظیر فاصله بین نوک لوله موئین و جمع کننده(فاصله ریسندگی)، اختلاف پتانسیل اعمالی،سرعت تغذیه محلول و فشار هیدروستاتیک در مخزن محلول، قدرت میدان الکترودها .

•تأثیرات محیطی نظیر دما، رطوبت و جریان هوا.

رفتار پلی ساکاریدها در پاسخ به میدان الکتریکی زیاد اعمال شده در فرایند الکتروریسی را می توان در سه گروه طبقه بندی کرد: (۱) گروه اول می تواند الیاف تشکیل دهد ، (۲) گروه های دوم می توانند جت تولید کنند اما الیاف را تشکیل نمی دهند ، (۳) گروه سوم قادر به تشکیل جت نیست [2] .

در سال‌های اخیر نانوالیاف الکتروریسی شده به دلیل خواص منحصر به فردی که دارند کاربردهای گسترده‌ای در صنایع نساجی ، آرایشی و بهداشتی و پزشکی پیدا کرده اند. این خواص شامل نسبت سطح به حجم و تخلخل بالا به همراه اندازه حفرات پایین است که می تواند باعث آزاد شدن مواد فعال شود و انتقال بخار آب موجود در بسته را تسهیل کند. روش ریسندگی الکتریکی با توجه به برخی مزایا ، مانند تولید در دمای محیط بدون استفاده از حلالهای سمی می تواند به عنوان روشی مناسب برای نانوکپسوله سازی ترکیبات زیست فعال در صنایع غذایی برای حفظ ایمنی غذا در نظر گرفته شود [3]. مطالعات زیادی در زمینه نانوکپسوله سازی ترکیبات زیست فعال از طریق

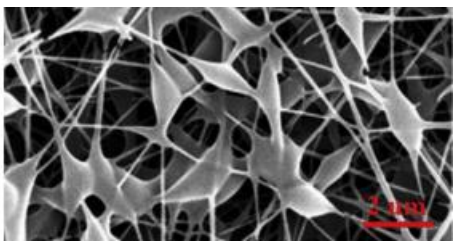
فرایند الکتروریسی برای محافظت و انتقال این ترکیبات زیست فعال به منطقه مورد نظر انجام شده است . چندین اسانس در حال حاضر از طریق الکتروریسی روی نانوالیاف بارگذاری شده اند که شامل دارچین[4] ، آویشن [5] ، نعناع ، بابونه [6] ، میخک [7] ، اکالیپتوس [8] ، زنجبیل [9] ، گل داودی [10] و پرتقال [11] . الیاف electrospun (یا تشک های الیافی) به تغییرات جو محیط بیشتر پاسخ می دهند و در مقایسه با فیلم های جامد معمولی ، آزادی انتشار مواد کپسوله را کنترل می کنند [12] . این روش به فرآیندی رایج در میان روش‌های تولید نانوالیاف به دلیل سادگی، سرعت، کارایی بالا و آماده‌سازی ارزان آن تبدیل شده است . الکتروریسی یک روش کارآمد و مقرون به صرفه برای تولید الیاف از پلیمرهای طبیعی و مصنوعی است . در فراوری و بسته بندی مواد غذایی ، الیاف electrospun برای تثبیت یا کنترل آزادسازی ترکیبات زیست فعال استفاده میشود.

۲. الکتروریسی نانوفیبرهای پلیمرهای طبیعی در صنایع غذایی

۲,۱. الکتروریسی پلی ساکاریدها

۲,۱,۱. کیتوزان

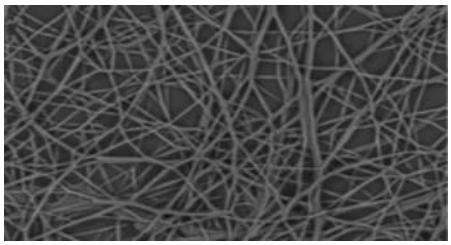
کیتوزان یک پلی ساکارید قلیایی کاتیونی است. می توان آن را از استیلاسیون کیتین بدست آورد. کیتوزان دارای قابلیت تشکیل فیلم خوب ، تجزیه پذیر زیستی و فعالیت ضد باکتریایی است. بنابراین یک پلیمر ایده آل برای کاربردها در صنایع غذایی است. برای مثال نانوالیاف کامپوزیتی الکترواسپون از کیتوزان و پلی وینیل الکل (PVA) ساخته شده است که بر روی آن ها گلوکز اکسیداز ((GOD) دارای خاصیت آنتی اکسیدانی) برای تشخیص گلوکز بارگذاری شده است [13] . کیتوزان و PVA مخلوط می شوند تا تشک های الکتروریسی با فعالیت ضد میکروبی تولید شوند (شکل ۲) . ثبات طولانی مدت GOD بر روی تشک ها، تکرارپذیری خوب و عدم تداخل سایر گونه های فعال الکتریکی برای تشخیص گلوکز از جمله ویژگی های آنهاست. غشاهای الکتروریسی بدست آمده ۷۳ درصد اکسیداسیون را برای نمونه آزمایش شده کیک های ژله ای و خامه ای نشان می دهد. در این صورت نانوالیاف کامپوزیتی در حفظ غذاهای غنی از شکر یا نیمه جامد اثر کمتری دارند.



شکل ۲ . تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوالیاف PVA/CS/عصاره چای/نانولوله های GOD.

۲,۱,۲. نشاسته

نشاسته یک کربوهیدرات پلیمری طبیعی است که از واحدهای گلوکز متصل بهم با پیوند گلیکوزیدی تشکیل شده است. برای بهبود خواص تشکیل فیلم و مقاومت در برابر کشش لازم است که نشاسته خام از نظر شیمیایی اصلاح شود. Kong و Ziegler رابطه کمی بین قطر فیبر و پارامترهای الکتروریسی ، مانند غلظت ، ولتاژ بالا اعمال شده ، فاصله چرخش و سرعت جریان را تجزیه و تحلیل کردند [14] . بر اساس تجزیه و تحلیل سطح پاسخ ، غلظت نشاسته بیشترین تأثیر را بر قطر فیبر دارد. نسبتهای ولتاژ به فاصله و غلظت پلیمر به فاصله برای پیش بینی قطر فیبر ضروری است . برای بهبود پایداری آب و بلوری شدن الیاف نشاسته ، آنها را در محلول ۵۰٪ اتانول آبی قرار داده و سپس به مدت ۱ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به عنوان تیمار پس از ریسندگی گرم می شوند. پس از آن ، الیاف در محلول آبی ۲۵٪ گلوتارآلدئید (GTA) غوطه ور می شوند تا پیوند عرضی ایجاد شود. الیاف نشاسته بدست آمده می تواند در صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرد که در شکل ۳ الیاف نشاسته خالص را میتوان مشاهده کرد [14] .



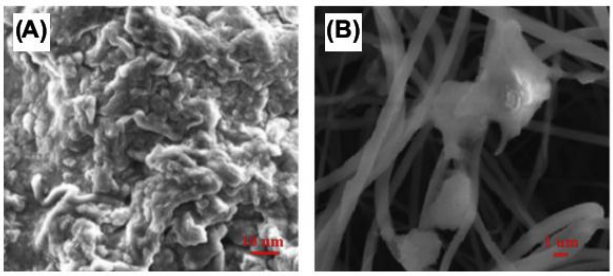
شکل ۳ . الیاف نشاسته خالص

Laura Martins و همکارانش مطالعه ای انجام دادند که هدف از این مطالعه ارزیابی حساسیت in vitro قارچ ها به نانوالیاف نشاسته تولید شده توسط الکتروریسی بود[15] . نانوالیاف در خمیر نان گنجانده شده یا در تولید بسته های فعال برای به حداقل رساندن فساد نان استفاده شده است. حداقل غلظت بازدارندگی (MIC) برای نانوالیاف با ۳۰٪ کارواکرول ۰،۰۹۸ و ۹،۸ میلی گرم بر میلی لیتر به ترتیب در برابر گونه های Penicilliumو Aspergillus flavus بود و حداقل غلظت بازدارندگی برای ۴۰ ٪ کارواکرول برابر ۱۹/۶ میلی گرم بر میلی لیتر در برابر آسپرژیلوس فلاووس بود. در مورد حداقل غلظت قارچ کش(MFC) ، اثر قارچ کش فقط برای نانوالیاف با ۳۰ ٪ کارواکرول ، با ۱۹/۶ میلی گرم بر میلی لیتر در برابر Penicillium sp مشاهده شد. پس در نتیجه کارواکرول آزاد فعالیت ضد قارچی بالایی را علیه Penicillium sp وAspergillus flavus نشان می دهد . این یافته ها نشان می دهد که نانوالیاف نشاسته/کارواکرول برای استفاده به عنوان محافظ های زیستی نان مناسب است [15] .

۲،۱،۳. آلژینات

آلژینات یک پلیمر پلی ساکاریدی با منشا طبیعی است. الکترواسپون آلژینات یک حامل خوب برای محافظت و تثبیت ریز مغذی ها و سایر اجزای زیست فعال در محصولات غذایی است. به دلیل گرانروی زیاد و سفتی زنجیره مولکولی ، محلول آلژینات خالص نمی تواند الکترواسپون شود. افزودن پلی وینیل پیرولیدون (PVP) یا پلی اتیلن اکسید (PEO) به آلژینات می تواند عملکرد الکترواسپون محلول آلژینات را به طور موثری بهبود بخشد[16] . در شکل ۴ مورفولوژی نانوالیاف ساخته شده از مخلوط PEO/alginate و PVA/alginate را میتوان مشاهده کرد [16] .

PEO/alginate PVA/alginate

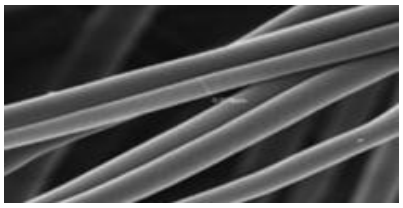


شکل ۴ . A و B مورفولوژی نانوالیاف ساخته شده از مخلوط PEO/alginate و PVA/alginate با لیپاز را نشان می دهد.

۲،۱،۴. سلولز

سلولز فراوان ترین پلی ساکارید در طبیعت و جزء اصلی ساختاری دیواره سلولی گیاهان است [17] . سلولز به دلیل متبلور بودن و پیوندهای هیدروژنی وسیع آن ، حلالیت ضعیفی در معرفهای آلی معمولی یا محلولهای آبی دارد که ساخت نانوالیاف سلولزی از طریق الکتروریسی را محدود می کند [18] .کورکومین یکی از رنگ دهنده های گوشت در صنایع غذایی است و در محلول پلیمری با غلظت

۲۰-۵ درصد وزنی برای ساخت نانوالیاف زیست فعال سلولزی از طریق الکتروریسی استفاده شده است [19]. در شکل ۵ ساختار نانوالیاف سلولز آمده است.



شکل ۵ . تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوالیاف سلولز

نانوالیاف الکترواسپون سلولز حاوی ۵٪ کورکومین دارای قطر متوسط ۶۰ ± ۳۱۴ نانومتر هستند ، در حالی که نانوالیاف حاوی ۲۰٪ کورکومین دارای قطر متوسط ۹۸± ۳۴۰ نانومتر هستند. فعالیت بیولوژیکی کورکومین پس از فرآیند الکتروریسی حفظ می شود. نانوالیاف سلولزی را می توان به عنوان غلیظ کننده و بافت دهنده برای سس ها ، محصولات لبنی ، نوشیدنی ها و محصولات گوشتی استفاده کرد [20]. آنها می توانند طعم های ناخوشایند را در غذا پنهان کنند. به دلیل عملکرد خوب در برابر حرارت و داشتن مقاومت حرارتی، نانوالیاف سلولزی را می توان به عنوان سیستم هایی برای محافظت از مواد زیست فعال حساس به حرارت استفاده کرد.

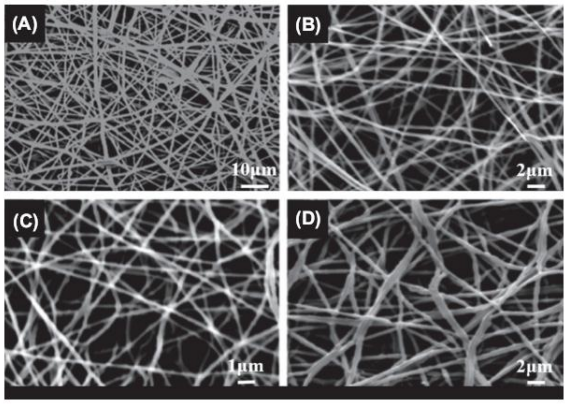
۲،۱،۵. دکستران

دکستران یک پلی ساکارید باکتریایی شاخه دار طبیعی است. دکستران در آب حل می شود و محلول با ویسکوزیته بالا ایجاد می کند و به طور گسترده ای به عنوان غلیظ کننده استفاده می شود. Jiang و همکارانش در مورد تاثیر غلظت حلال و پلیمر بر قابلیت اسپری پذیری دکستران گزارشی دادند [21]. در بین غلظت دکستران از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم بر میلی لیتر ، الیاف یکنواخت الکتروریسی از ۷۵۰ میلی گرم بر میلی لیتر دکستران دارای کوچکترین قطر ۱۰۰ نانومتر هستند و هنگامی که محلول الکتروسپون ۱ گرم بر میلی لیتر است ، قطرها به طور چشمگیری به ۳ میکرومتر افزایش می یابند. افزودن ۵ درصد وزنی آلبومین سرم گاوی (BSA) به ۷۵۰ میلی گرم بر میلی لیتر دکستران ، اندازه نانوالیاف را به ۵۰۰ نانومتر کاهش می دهد ، زیرا بارهای خالص افزایش یافته و نیروی بیشتری به جت ها وارد می کنند که در نهایت الیاف کوچکتر تولید می شود. فعالیت بیولوژیکی BSA پس از الکتروریسی با دکستران حفظ می شود . از نانوالیاف دکستران برای محصور کردن ویتامین E و تقویت پنیر استفاده شده است [22].

۲،۲. الکتروریسی پروتئین ها

۲،۲،۱. کازئین

کازئین پروتئین اصلی رسوب شده شیر در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و pH ۴،۶ است. بتا کازئین از گاو را می توان به عنوان امولسیفایر برتر و تثبیت کننده کلوئید استفاده کرد [23]. pH ایزو الکتریک کازئین ۴،۸ است. محلول حاوی فقط کازئین به دلیل نیروی بین مولکولی قوی و ساختار سه بعدی نمی تواند الکترواسپون شود. کامپوزیتی که برای ساخت آن PEO یا PVA را با کازئین مخلوط می کنند ، می تواند با موفقیت الکترواسپون شود . محلولهای ۱۰٪ کازئین حاوی ۸۰٪ PEO یا ۵۰٪ PVA برای الکترواسپون با قطر فیبر متوسط بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر استفاده می شود (شکل ۶) [24].

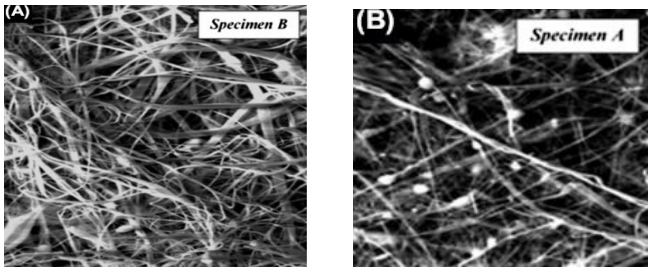


شکل ۶ . تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از حصیرهای الکتروریسی شده از محلول ۱۰٪ پلی وینیل الکل/کازئین با نسبت ۱۰۰:۰ (A) و ۷۰:۳۰ (B)و تصاویر SEM از تشک های electrospun از محلول ۵٪ پلی اتیلن اکسید/کازئین با نسبت ۱۰۰:۰ (C) و ۸۰:۲۰ (D) .

۲،۲،۲. پروتئین گندم

اجزای اصلی پروتئین گندم عبارتند از آلبومین ، گلوبولین ، گلیادین ، گلوتن و پروتئین های دیگر. پروتئین های گلیادین و گلوتن به عنوان پروتئین های ذخیره سازی شناخته می شوند. گلیادین رفتار چسبناکی از خود نشان می دهد ، در حالی که گلوتن حالت ارتجاعی دارد [25] . گلیادین نوعی پروتئین کروی مونومر با وزن مولکولی کوچکتر است. در بین پپتیدها پیوند دی سولفیدی وجود ندارد ، اما پیوندهای هیدروژنی ، پیوندهای آبگریز و پیوندهای دی سولفیدی درون مولکولی وجود دارد.

مطالعه ای انجام شد که در آن از نان با آرد گندم مشتق شده از گندم Hexaploid Triticum aestivum استفاده شده است.گلوتن گندم تجاری حاوی ۷۰،۲ یا ۷۵ درصد پروتئین به عنوان ماده اولیه استفاده شده است (شکل ۷) [25] . آن را در ۱،۱،۱،۳،۳،۳-هگزافلورو-۲-پروپانول (HFIP) در غلظت های ۵ تا ۱۰ ٪ غوطه ور می کنند تا محلول الکترواسپون به دست آید. نتایج نشان داد که قطر الیاف از چند میکرومتر به ده ها نانومتر کاهش می یابد. علاوه بر این ، ضخامت تشک های نانوالیاف مانند لایه پوست اما دارای ساختار متخلخل است.

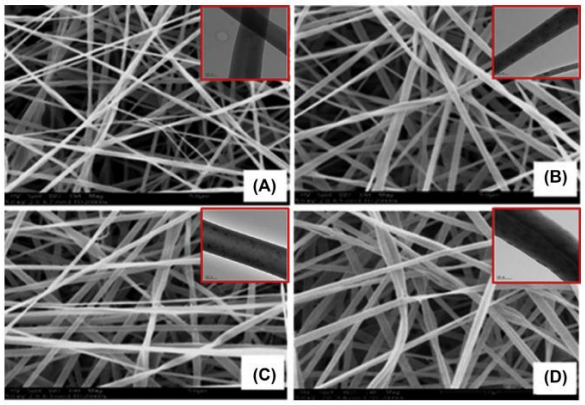


شکل ۷ . تصاویر میکروسکوپ الکترونی اسکن (A) نمونه B که گلوتن گندم حاوی ۷۰،۲٪ پروتئین (B) نمونه A، که گلوتن گندم حاوی ۷۵٪ پروتئین .

۲،۲،۳. زین

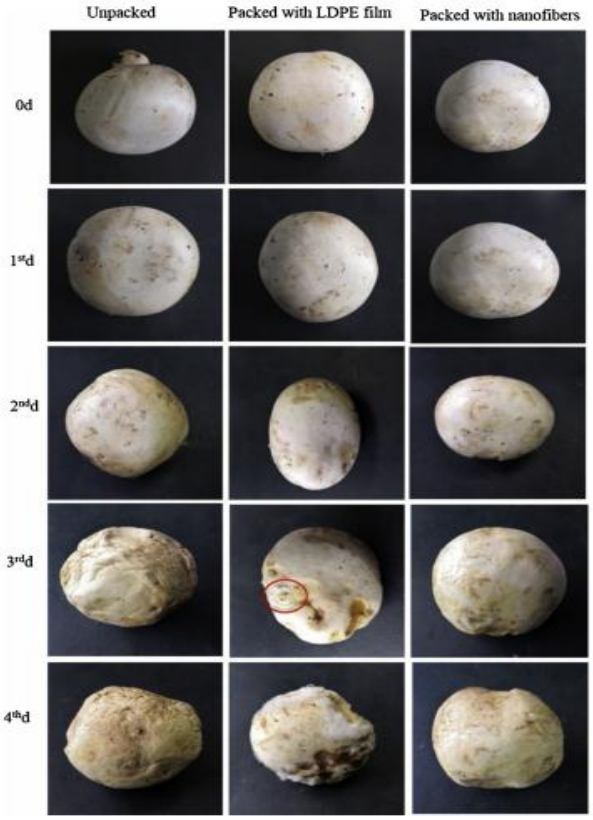
زین یک پروتئین ذخیره آبگریز نامحلول در آب در ذرت است. زین دارای خواص طبیعی مقاوم در برابر آب و چربی به دلیل وجود آمینو اسیدهای آپولار مانند پرولین ، لوسین و گلوتامین در آن است [26] . با توجه به خواص خوب تشکیل فیلم ،سازگاری زیستی و تجزیه پذیری زین ، بیشتر محققان بر روی الکتروریسی آن متمرکز شده اند. Altan ، Aytac و Uyar کارواکرول را در نانوالیاف زین محصور کردند تا خاصیت انتشار پایدار بهبود یابد و از نانوالیاف به عنوان بسته بندی فعال برای حفظ نان استفاده کردند [27] . Moomand و Lim روغن ماهی را در نانوالیاف زین قرار داده اند تا از روغن در برابر تخریب اکسیداتیو محافظت کنند ، نویسندگان گزارش دادند که روغن ماهی به طور یکنواخت در نانو الیاف توزیع شده و کارایی بالای انکپسولاسیون ماهی حاصل شده است [28] . اثربخشی فیلمهای

خوراکی زین حاوی اسانس برای غیرفعال یا کاهش میکروارگانیسمهای فساد و بیماریزا در سطوح پنیر ، از جمله لیستریا مونوسیتوژنز ، استافیلوکوکوس اورئوس و باکتریهای مزوفیلی هوازی ، مورد بررسی قرار گرفت . فیلم های زین خوراکی برای بسته بندی آجیل و گوجه فرنگی برای جلوگیری از خرابی ، تاخیر در کاهش وزن و کند شدن تغییرات رنگ در طول مدت انبارداری استفاده میشوند [29] .
گزارش شده است که ۲۵ درصد زین را در محلول آبی ۸۰ درصد اتانول حل کرده و ۵ درصد ، ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد اسید گالیک را به مخلوط اضافه کردند تا نانوالیاف الکتروریسی شود (شکل ۸) [30] . قطر الیاف کامپوزیت از ۳۲۷ تا ۳۸۷ نانومتر متغیر است. از نانوالیاف الکتروریسی زین در بسته بندی غذای خشک استفاده میشود زیرا در برابر حرارت و مواد شیمیایی پایداری نشان می دهد و در طول مدت انبارداری در دمای ۲۱,۵ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ روز با رطوبت نسبی تقریبا ۵۸ درصد جذب آب کمی دارد.



شکل ۸ . تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری تصاویر الیاف electrospun از مخلوط زین و ۰٪ اسید گالیک(A) ، ۵٪ اسید گالیک(B) ، ۱۰٪ اسید گالیک (C) و ۲۰٪ اسید گالیک(D).

Pingo و همکارانش مطالعه ای به شرح زیر انجام دادند [31] : قارچ ها را با سه تیمار بسته بندی کردند ، یکی با فیلم LDPE (پلی اتیلن با دانسیته پایین) ، دیگری با نانوالیاف زین/ SDS (سدیم دودسیل سولفات) و آخرین مورد بدون بسته بندی بسته بندی شدند (شکل ۹) . سورفکتانت غیر یونی و سورفکتانت یونی به محلول زین اضافه شد و سطح صاف و ساختارهای یکنواختی در تمام غلظت ها ایجاد شد ، که نشان می داد که زین با Tween 80 ، SDS ، CTAB به ترتیب سازگاری خوبی دارند . نتایج نشان داد که افزودن سورفکتانت های مختلف بر خواص نانوالیاف و انتشار CEO (اسانس دارچین)تأثیرگذار است. تداخل بین CTAB و زین میزان انتشار CEO در محلول آبی اتانول را کاهش می دهد ، در حالی که Tween 80 ، لسیتین و SDS میزان انتشار را افزایش می دهند. این مطالعه نشان داد که فیلم نانوالیاف می تواند عمر مفید قارچ را افزایش دهد.



شکل ۹ . در طی ۴ روز قارچ ها بدون بسته بندی ، با فیلم LDPE و با نانوالیاف زین/ SDS بررسی شده اند [31].

۳. الکتروریسی نانوفیبرهای پلیمرهای سنتتیک در صنایع غذایی

در مقایسه با پلیمرهای منشا طبیعی ، پلیمرهای مصنوعی دارای خواص بسیار عالی هستند :

۱) خواص مکانیکی و قابلیت ماشین کاری پلیمرهای طبیعی به طور کلی ضعیف است .

۲) به طور معمول پلیمرهای طبیعی نیاز به تصفیه دارند ، که این کار سخت و گران است. پلیمرهای مصنوعی با خلوص بالا به راحتی در مقیاس بزرگ به دست می آیند .

برای استفاده از نانوالیاف الکتروریسی در صنایع غذایی باید جنبه های زیر را در نظر بگیرد:

۱) خود پلیمر و حلال باید سمی نبوده و از قابلیت زیست سازگاری و تجزیه پذیری بالایی برخوردار باشند تا اطمینان حاصل شود که پس از خوردن ، هیچ آسیبی به بدن انسان وارد نمی شود.

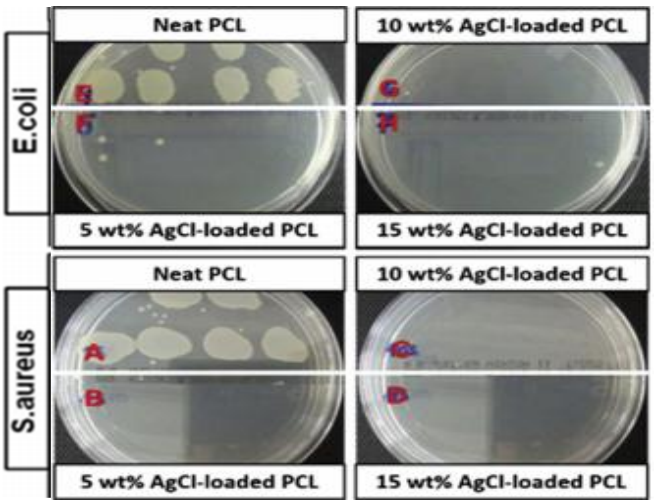
۲) پلیمر نباید بر ترکیب غذا و یا بر ارزش خوراکی آن تأثیر منفی بگذارد و نباید با اجزای غذا واکنش نشان دهد .

۳) نانوالیاف نباید بر احساس دهان غذا تأثیر بگذارد .

به دلیل این الزامات طاقت فرسا ، موادی که می توان برای سنتز نانوالیاف در صنایع غذایی به کاربرد محدود است ، PCL ، PVA ، PEO و PLA کاندیداهای ایده آل برای کاربرد در بخش غذایی هستند. Aytak و همکارانش رفتار انتشار مجموعه آنتی اکسیدانی گالیک اسید سیکلودکسترین محصور شده توسط نانوالیاف الکتروریسی پلی لاکتیک اسید (PLA) را در سه محیط: آبی ، ۱۰٪ و ۹۵٪ اتانول مورد بررسی قرار دادند [32] .

۳،۱. پلی کاپرولاکتون

PCL یک پلی استر پلی ویدروکسی آلیفاتیک با درجه تجزیه پذیری زیستی و سازگاری زیستی بالا است که به طور گسترده ای به عنوان حامل اجزای عملکردی مورد استفاده قرار می گیرد. Shao و همکارانش پلی فنول های چای سبز را وارد PCL و الیاف کامپوزیتی نانولوله های کربنی چند جداره کرده اند [33] . مطالعات نشان داده است که نانوالیاف مملو از پلی فنول های چای عوارض جانبی کمتری بر روی اُستئوبلاست های طبیعی دارند ، در حالی که تأثیر مهاری قوی بر روی سلول های تومور دارند. از نانوالیاف PCL نیز برای جلوگیری از رشد میکروارگانیسم ها استفاده می شود . ادریس سروکز و همکارانش کلرید نقره را در نانوالیاف PCL بارگذاری کردند [34] . در آزمایش های ضد میکروبی ، نانوالیاف PCL حاوی کلرید نقره از رشد ۹۹,۹۹۹۹٪ S. aureus و E. coli که باکتری های اصلی بیماری زا در غذا هستند جلوگیری کرد (شکل ۱۰) [34] .



شکل ۱۰

۳،۲. پلی اتیلن اکسید

PEO یک پلیمر ترموپلاست محلول در آب است. وزن مولکولی PEO می تواند در طیف وسیعی متفاوت باشد که این باعث میشود مجموعه هایی با بسیاری از ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم ، پلیمرها و الکترولیت های معدنی تشکیل دهد . PEO محلول در آب و غیر سمی است . Sachin Talwar و همکارانش پروتئین آب پنیر و بتا گلوبولین را برای الکتروریسی تحت شرایط اسیدی به PEO اضافه کردند و در نهایت نانوالیاف با قطر ۳۱۲ تا ۶۹۰ نانومتر بدست آمد [35] . این الیاف کامپوزیتی می توانند مورفولوژی خود را در دمای بالاتر از نقطه ذوب PEO حفظ کنند . Kamran Ghaedi و همکارانش غشای کامپوزیتی نانوالیاف کامپوزیتی دکستران کفیران /PEO را تهیه کرده اند [36] . آزمایش های ضد باکتری نشان می دهد که غشای کامپوزیت دارای فعالیت ضد باکتریایی علیه S. aureus است. علاوه بر این ، این مطالعه همچنین تجزیه پذیری زیست محیطی غشای کامپوزیت را بررسی می کند و طیف مادون قرمز نشان می دهد که غشای کامپوزیت کفیران /PEO می تواند تجزیه زیستی شود . از این غشای نانوالیاف می توان در بسته بندی مواد غذایی و نگهداری مواد غذایی استفاده کرد.

۴. کاربرد الکتروریسی در فناوری بسته بندی مواد غذایی

بسته بندی ، به عنوان یک جزء خارجی غذا ، با محافظت از مواد غذایی از فساد در طول توزیع به مصرف کنندگان نهایی ، نقش مهمی در حفظ غذا ایفا می کند [37] . الیاف الکتروسپون برای بسته بندی مواد غذایی دارای مزایای ساختاری و عملکردی هستند. ابتدا الیاف مزایایی را در مورفولوژی قابل کنترل ، تخلخل زیاد ، سطح بزرگ و اثرات در مقیاس نانو نشان می دهند که برای افزایش قابلیت ها مفید هستند [38] . ثانیا کارآیی بالا و پایداری در برابر گرما و مواد شیمیایی آنها را به حاملهای مناسبی برای ترکیبات زیست فعال و در نتیجه برای کاربرد آن در بسته بندی مواد غذایی تبدیل می کند .

به طور کلی اهداف اولیه بسته بندی مواد غذایی شامل جنبه های زیر است [39] :

(۱) جلوگیری از رشد میکروارگانیسم ها ، مقاومت در برابر اکسیداسیون و ثبات در برابر خطرات زیست محیطی

(۲) پوشاندن بوهای نامطبوع و حفظ طعم

(۳) تحویل مواد مغذی و تسهیل انتشار پایدار

(۴) کمک به تصفیه و تجمع عناصر

(۵) به عنوان حامل حسگرهای زیستی برای تشخیص

که با استفاده از نانوالیاف الکتروریسی میتوان به این اهداف تحقق یافت.

۵. نتیجه گیری

یکی از مهمترین پیشرفتها استفاده از مواد بسته بندی الکتروریسی مواد غذایی است که امکان کنترل خواص ساختاری مواد بسته بندی در مقیاس نانو با انتخاب مناسب اجزا و مسیر آماده سازی را فراهم می کند در حالی که امکان بارگذاری زیاد عوامل فعال را فراهم می کند . فرایند الکتروریسی امکان تهیه مواد الکترواسپون بسته بندی مواد غذایی سازگار با محیط زیست و استفاده از پلیمرهای زیستی ، پلیمرهای مصنوعی زیست سازگار و نانوکامپوزیت های آنها را فراهم می آورد . استفاده از چنین پلیمرهایی با ترکیب بیشتر اجزای فعال امکان ساخت مواد بسته بندی فعال با خواص ضد میکروبی ، ضد قارچی یا آنتی اکسیدانی را می دهد . نسبت بالای سطح به حجم ، سهولت محصور کردن عوامل فعال در الیاف ، اندازه منافذ کوچکتر بین الیاف در هم تنیده (برای جلوگیری از ورود باکتری) و اندازه کوچک الیاف که با رهاسازی به موقع مولکول های فعال پاسخ سریع را می دهد، مزایای اصلی مواد electrospun در بسته بندی مواد غذایی است. از آنجا که مواد به کار رفته در مواد غذایی و مواد تشکیل دهنده بسته بندی ، از جمله حلال ها باید دارای وضعیت GRAS (به طور کلی به عنوان ایمن شناخته شده) باشند. این مسائل در حال حاضر به عنوان موانع عمده در کاربردهای بسته بندی مواد از مواد الکتروسپون وجود دارند. این مشکل را می توان با انتخاب پلیمرها و سیستمهای حلال مناسب ، مانند حلالهای سبز تجاری حل کرد. در این راستا ، برای تولید مواد بسته بندی فیبری بدون نیاز به حلال سمی می توان از ذوب الکتروسپینگ استفاده کرد.

مسئله مهم دیگر ساختار بسیار متخلخل آنهاست که عملکرد حفاظتی آن را به شدت کاهش می دهد. بخار آب و اکسیژن می تواند به راحتی از چنین ماتریس های متخلخل الیاف پلیمری نفوذ کنند. در این راستا ، استفاده از پلیمرها یا ترکیباتی که بتوانند بخار آب و اکسیژن را جذب کنند بسیار مهم است. مهمترین عیب فیبرهای الکتروریسی در بسته بندی مواد غذایی ، اتصال الیاف شل روی غذاهاست.

فیلم های بسته بندی مواد غذایی در یک ساختار چند لایه یا با استفاده از لایه هایی از الیاف پلیمری مختلف یا با فیلم می توانند نفوذپذیری مولکول های اکسیژن و آب را به شدت کاهش دهند و در نتیجه ماندگاری مواد غذایی را افزایش دهند. از سوی دیگر ، اگرچه بسیاری از مطالعات بر تولید مواد فعال الکترواسپون متمرکز شده اند ، اما مطالعات بیشتری مورد نیاز است تا عملکرد آنها را در دراز مدت با غذاها و کاربرد آنها را به نحوی امکان پذیر مشاهده کنیم. علاوه بر این ، مطالعات مقایسه ای برای آزمایش عملکرد آنها با فیلم های معمولی ساخته شده توسط اجزای یکسان ضروری است.

منابع

[1] F. Topuz, T. Uyar : Antioxidant, Antibacterial and Antifungal Electrospun Nanofibers for Food Packaging Applications, Food Research International (2019), doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108927 .
[2] Stijnman, A. C., Bodnar, I., & Tromp, R. H. (2011). Electrospinning of food-grade polysaccharides. Food Hydrocolloids, 25(5), 1393–1398.
[3] Ramakrishna, S., Jose, R., Archana, P., Nair, A., Balamurugan, R., Venugopal, J., et al. (2010). Science and engineering of electrospun nanofbers for advances in clean energy, water fltration, and regenerative medicine. Journal of Materials Science, 45 (23), 6283–6312.
[4] Wen, P., Zhu, D. H., Feng, K., Liu, F. J., Lou, W. Y., Li, N., et al. (2016). Fabrication of electrospun polylactic acid nanofilm incorporating cinnamon essential oil/β-cyclo- dextrin inclusion complex for antimicrobial packaging. Food Chemistry, 196, 996–1004. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.043.
[5] Lin, L., Zhu, Y., & Cui, H. (2018). Electrospun thyme essential oil/gelatin nanofibers for active packaging against Campylobacter jejuni in chicken. LWT, 97, 711718. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.08.015.
[6] Huang, D., Zhou, Y., Lan, X., Miao, X., Luo, T., Wang, H., et al. (2019). Electrospun gelatin nanofibers encapsulated with peppermint and chamomile essential oils as potential edible packaging. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67, 2227–2234. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b06226 research-article.
[7] Cui, H., Bai, M., Rashed, M. M. A., & Lin, L. (2018). The antibacterial activity of clove oil/ chitosan nanoparticles embedded gelatin nano fibers against Escherichia coli O157 : H7 bio films on cucumber. International Journal of Food Microbiology, 266,69–78.
[8] Antunes, M. D., da Silva Dannenberg, G., Fiorentini, Â. M., Pinto, V. Z., Lim, L. T., da Rosa Zavareze, E., et al. (2017). Antimicrobial electrospun ultrafine fibers from zein containing eucalyptus essential oil/cyclodextrin inclusion complex. International Journal of Biological Macromolecules, 104, 874–882. https://doi.org/10.1016/j. ijbiomac.2017.06.095.
[9] da Silva, F. T., da Cunha, K. F., Fonseca, L. M., Antunes, M. D., El Halal, S. L. M., Fiorentini, Â. M., et al. (2018). Action of ginger essential oil (Zingiber officinale) encapsulated in proteins ultrafine fibers on the antimicrobial control in situ. International Journal of Biological Macromolecules, 118, 107–115. https://doi.org/10. 1016/j.ijbiomac.2018.06.079.
[10] Lin, L., Mao, X., Sun, Y., Rajivgandhi, G., & Cui, H. (2019). Antibacterial properties of nanofibers containing chrysanthemum essential oil and their application as beef packaging. International Journal of Food Microbiology, 292(December 2018), 21–30. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.12.007.
[11] Tavassoli Kafrani, E., Goli, S. A. H., & Fathi, M. (2018). Encapsulation of orange essential oil using cross-linked electrospun gelatin nanofibers. Food and Bioprocess Technology,11(2), 427–434. https://doi.org/10.1007/s11947-017-2026-9.
[12] L. Li, H. Wang, M. Chen, S. Jiang, J. Cheng, X. Li, M. Zhang, S. Jiangb : Gelatin/zein fiber mats encapsulated with resveratrol: Kinetics, antibacterial activity and application for pork preservation, Food Hydrocolloids (2020), doi: https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105577 .
[13] Bhushani, J.A., Anandharamakrishnan, C., 2014. Electrospinning and electrospraying techniques: potential food based applications. Trends in Food Science & Technology 38, 21e33.
[14] Kong, L., Ziegler, G.R., 2013. Quantitative relationship between electrospinning parameters and starch fiber diameter. Carbohydrate Polymers 92, 1416e1422.

[15] L.M. Fonseca, E.J.D. Souza, M. Radünz, E.A. Gandra, E.R. Zavareze, A.R.G. Dias : Suitability of starch/carvacrol nanofbers as biopreservatives for minimizing the fungal spoilage of bread, Carbohydrate Polymers 252 (2021) 117166,https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117166 .
[16] Dogac ¸, Y._ I., Deveci, _ I., Mercimek, B., Teke, M., 2017. A comparative study for lipase immobilization onto alginate based composite electrospun nanofibers with effective and enhanced stability. International Journal of Biological Macromolecules 96, 302 311.
[17] De Siqueira, F.G., Ferreira Filho, E.X., 2010. Plant cell wall as a substrate for the production of enzymes with industrial applications. Mini-reviews in Organic Chemistry 7, 54e60.
[18] Bochek, A.M., 2003. Effect of hydrogen bonding on cellulose solubility in aqueous and nonaqueous solvents. Russian Journal of Applied Chemistry 76, 1711e1719.
[19] Suwantong, O., Opanasopit, P., Ruktanonchai, U., Supaphol, P., 2007. Electrospun cellulose acetate fiber mats containing curcumin and release characteristic of the herbal substance. Polymer 48, 7546e7557.
[20] Rezaei, A., Nasirpour, A., Fathi, M., 2015. Application of cellulosic nanofibers in food science using electrospinning and its potential risk. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 14, 269e284.
[21] Jiang, H., Fang, D., Hsiao, B.S., Chu, B., Chen, W., 2004. Optimization and characterization of dextran membranes prepared by electrospinning. Biomacromolecules 5, 326.
[22] Fathi, M., Nasrabadi, M.N., Varshosaz, J., 2016. Characteristics of Vitamin E-Loaded Nanofibres From Dextran.
[23] Liu, Y., Guo, R., 2008. pH-dependent structures and properties of casein micelles. Biophysical Chemistry 136,67-73.
[24] Xie, J., Hsieh, Y.L., 2003. Ultra-high surface fibrous membranes from electrospinning of natural proteins: casein and lipase enzyme. Journal of Materials Science 38, 2125e2133.
[25] Veraverbeke,W.S., Delcour, J.A., 2002.Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 42, 179.
[26] Wang, Y., & Chen, L. (2012). Electrospinning of prolamin proteins in acetic acid: The effects of protein conformation and aggregation in solution. Molecular Materials and Engineering, 297, 902-913
[27] Altan, A., Aytac, Z., & Uyar, T. (2018). Carvacrol loaded electrospun fibrous films from zein and poly(lactic acid) for active food packaging. Food Hydrocolloids, 81,48–59.
[28] Moomand, K., & Lim, L. T. (2014). Oxidative stability of encapsulated fish oil in electrospun zein fibres. Food Research International, 62(8), 523–532.
[29] Cagri, A., Ustunol, Z., Ryser, E.T., 2004. Antimicrobial edible films and coatings. Journal of Food Protection 67,833e848.
[30] Neo, Y.P., Ray, S., Jin, J., Gizdavic-Nikolaidis,M., Nieuwoudt,M.K., Liu, D., Quek, S.Y., 2013. Encapsulation of food grade antioxidant in natural biopolymer by electrospinning technique: a physicochemical study based on zein-gallic acid system. Food Chemistry 136, 1013-1021.
[31] P.Shaoa, Y.Liua, Ch.Ritzoulis, B.Niu : Preparation of zein nanofibers with cinnamaldehyde encapsulated in surfactants at critical micelle concentration for active food packaging, Food Packaging and Shelf Life 22 (2019) 100385, doi: https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100385 .
[32] Aytac, Z., Keskin, N. O. S., Tekinay, T., & Uyar, T. (2017). Antioxidant α-tocopherol/ γ-cyclodextrin–inclusion complex encapsulated poly (lactic acid) electrospun nanofbrous web for food packaging. Journal of Applied Polymer Science, 134(21).

[33] Shao, S., Li, L., Yang, G., Li, J., Luo, C., Gong, T., Zhou, S., 2011. Controlled green tea polyphenols release from electrospun PCL/MWCNTs composite nanofibers. International Journal of Pharmaceutics 421, 310e320.
[34] Idris, C., Ayse, S., Sukhwinder, K.B., 2017. Fabrication and characterization of electrospun poly(e-caprolactone) fibrous membrane with antibacterial functionality. Royal Society Open Science 4.
[35] Sullivan, S.T., Tang, C., Kennedy, A., Talwar, S., Khan, S.A., 2014. Electrospinning and heat treatment of whey protein nanofibers. Food Hydrocolloids 35, 36e50.
[36] Jenab, A., Roghanian, R., Emtiazi, G., Ghaedi, K., 2016. Manufacturing and structural analysis of antimicrobial kefiran/polyethylene oxide nanofibers for food packaging. Iranian Polymer Journal (English Edition) 26, 31e39.
[37] Rooney, M.L., 1995. Overview of Active Food Packaging. Springer US.
[38] Shen, X.X., Yu, D.G., Zhu, L.M., Branford-White, C., White, K., Chatterton, N.P., 2011. Electrospun diclofenac sodium loaded Eudragit (R) L 100-55 nanofibers for colon-targeted drug delivery. International Journal of Pharmaceutics 408, 200 207.
[39] Noruzi, M., 2016. Electrospun nanofibres in agriculture and the food industry: a review. Journal of the Science of Food and Agriculture 96, 4663e4678.