

Polymerization
Quarterly, 2014
Volume 4, Number 1
Pages 56-66
ISSN: 2252-0449

A Review on Controlled Release Antimicrobial Food Packaging

Masoumeh Nasrollahzadeh, and Fariba Ganji*
Biomedical Engineering Group, Faculty of Chemical Engineering,
Tarbiat Modares University, P.O. Box: 14115-114, Tehran, Iran

Received: 6 September 2013, Accepted: 28 April 2014

Abstract

In order to control microbial growth in foods and improve their shelf-life and safety, the actions of different antimicrobial agents were studied by mixing them with food formulations, or they were applied onto food surface by spraying. Incorporation of antimicrobial agents directly into food is appropriate when there is a risk of microbial growth at both surface and internal parts of final food products. However, when the main cause of spoilage of food is microbial growth at its surface, the use of excessive amounts of chemical additives into food would be necessary. Thus, this traditional strategy does not fit into the current trend of food technology to develop healthier processed foods by using minimum amounts of chemical additives. The use of polymers as packaging materials containing antimicrobial agents is an alternative to overcome these limitations. Antimicrobial food packaging is based on controlled release of antimicrobial agents on packed food surfaces to maintain a predetermined concentration of the active compound for a determined period of time to reduce, inhibit or retard the growth of pathogenic microorganisms. In this article, different types of food packaging with controlled release properties of antimicrobial agents are studied and some mathematical models are presented to describe the release kinetics of active compound.

Key Words

antimicrobial food packaging,
antimicrobial components,
controlled release,
polymeric film,
mass transfer

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: fganji@modares.ac.ir

بسپارش

فصلنامه علمی - ترویجی

سال چهارم، شماره ۱

صفحه ۶۶-۵۶، ۱۳۹۳

ISSN: 2252-0449

مروری بر بسته‌بندی‌های غذایی ضد میکروب با رهایش کنترل شده

معصومه نصراله‌زاده، فریبا گنجی*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پزشکی، صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۱۱۵

دریافت: ۱۳۹۲/۶/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۸

برای کنترل رشد میکروب‌ها در مواد غذایی و افزایش عمر نگهداری و امنیت غذا، عوامل ضد میکروب متفاوت با فرمول‌بندی اولیه ماده غذایی آمیخته می‌شود یا با روش‌های مختلف مثل افشاندن روی سطح غذا قرار می‌گیرند. افزودن مستقیم عامل ضد میکروب به ماده غذایی در جایی مفید است که خطر رشد میکروب‌ها هم روی سطح و هم داخل ماده غذایی وجود دارد. اما، هنگامی که علت اصلی تخریب، رشد میکروب‌ها در سطح ماده غذایی است، استفاده از این روش نیازمند افزودن مقادیر زیادی افزودنی شیمیایی به ماده غذایی است. بنابراین، روش سنتی یادشده با در نظر گرفتن حداقل مقدار مجاز افزودنی‌های شیمیایی برای بهبود سلامتی غذا مناسب نیست. رویکرد جدید غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده از فیلم‌های پلیمری بسته‌بندی حاوی ماده فعال ضد میکروب است. بسته‌بندی ضد میکروب بر مبنای رهایش تدریجی عامل ضد میکروب موجود در پلیمر بسته‌بندی به سطح ماده غذایی استوار است. آزادسازی ماده ضد میکروب باید با سرعت مناسب و معین انجام گیرد تا در طول دوره ذخیره‌سازی غلظت لازم را برای مقابله با ریزسازواره‌های مخرب در اختیار سطح ماده غذایی قرار دهد. در این مقاله، انواع بسته‌بندی‌های غذایی با خاصیت رهایش کنترل شده عامل ضد میکروب، فیلم‌های پلیمری استفاده شده و مدل‌های ریاضی ارائه شده برای کنترل مقدار رهایش بررسی می‌شوند.

چکیده



فریبا گنجی



معصومه نصراله‌زاده

واژگان کلیدی

بسته بندی غذایی ضد میکروب،
ترکیبات ضد میکروب،
رهایش کنترل شده،
فیلم پلیمری،
انتقال جرم

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

fganji@modares.ac.ir

مقدمه

به منظور کنترل رشد میکروب‌ها در مواد غذایی و افزایش عمر نگهداری و امنیت آنها، عوامل ضد میکروب متفاوتی با فرمول‌بندی اولیه ماده غذایی آمیخته می‌شوند یا روی سطح غذا قرار می‌گیرند. افزودن مستقیم عامل ضد میکروب به ماده غذایی در جایی که خطر رشد میکروب‌ها هم روی سطح و هم داخل ماده غذایی وجود دارد، مناسب و مفید است. اما، هنگامی که علت اصلی تخریب ماده غذایی ناشی از رشد میکروب‌ها در سطح باشد، استفاده از این روش نیازمند افزودن مقادیر زیادی افزودنی‌های شیمیایی به ماده غذایی است [۱].

به طور کلی، افزودن عامل ضد میکروب به فرمول‌بندی اولیه غذا همواره راهکار موثری برای جلوگیری از رشد میکروب‌ها نیست، زیرا قابلیت حمایتی عامل ضد میکروب با از بین رفتن ساختار اولیه آن طی واکنش با ماده غذایی کاهش می‌یابد و کیفیت غذا با سرعت افزایشی رو به کاهش می‌گذارد. افزون بر آن، ترکیبات ضد میکروب که به طور مستقیم به غذا اضافه می‌شوند، نمی‌توانند به طور انتخابی و هدف‌دار، سطح غذا را (جایی که واکنش‌های تخریبی بیشتر ظاهر می‌شوند) انتخاب کنند. بسته‌بندی‌های ضد میکروب، روشی مناسب برای غلبه بر این محدودیت‌ها هستند، زیرا عامل ضد میکروب طی فرایند ذخیره سازی به‌طور آهسته از روکش بسته‌بندی به سطح غذا نفوذ می‌کند و غلظت لازم را برای جلوگیری از رشد میکروب‌ها در اختیار ماده غذایی قرار می‌دهد [۱].

عامل مهم در کنترل کیفیت و امنیت غذا، سرعت رهایش عامل ضد میکروب از پوشش بسته‌بندی است. اگر سرعت رهایش عامل ضد میکروب از فیلم پلیمری به سطح غذا زیاد و سریع باشد، سبب نفوذ عامل از سطح غذا به بخش‌های درونی می‌شود. در نتیجه، غلظت سطحی مناسب برای جلوگیری از رشد میکروب‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، نفوذ آن به داخل ماده غذایی سبب آلودگی ماده غذایی می‌شود. اگر سرعت رهایش بسیار کم باشد، غلظت جلوگیری کننده لازم روی سطح به دست نمی‌آید، در نتیجه واکنش‌های تخریبی روی سطح آغاز شده و کیفیت و امنیت غذا حفظ نمی‌شود [۲]. بنابراین، طراحی فیلم پلیمری ضد میکروب که قابلیت کنترل رهایش عامل ضد میکروب را داراست، مبحثی است که در دهه‌های اخیر بیان شده است.

مطالعات مربوط به فیلم‌های پلیمری بسته‌بندی غذایی با خواص رهایش کنترل شده بسیار محدود و اندک است. مفهوم رهایش کنترل شده برای کاربرد در بسته‌بندی‌های غذایی اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط هان و فلوروز بیان شد. آنها پیشنهاد دادند، به منظور

کنترل سرعت رهایش از یک ساختار چندلایه شامل یک لایه خارجی غشایی، یک لایه ماتریسی شامل عامل فعال و یک لایه کنترل استفاده شود. حاصل این روش افزایش زمان رهایش ماده ضد میکروب و کنترل آن بود. روش مشابهی نیز توسط لویز-روبیو و همکاران ارائه شد. در این ساختارها، لایه کنترل داخلی سرعت نفوذ ماده فعال را کنترل می‌کند و مانع تماس مستقیم آن با غذا می‌شود. لایه خارجی نیز از مهاجرت عامل فعال به سمت بیرون بسته ممانعت به عمل می‌آورد [۳،۴].

بونوکور و همکاران بر پایه پژوهش‌های هان و فلوروز، فیلم‌های پلیمری چندلایه دوتایی شامل ماده فعالی را پیشنهاد کردند که محتوی دو لایه کنترل کننده خارجی و یک لایه داخلی بودند. مزیت این روش نسبت به پژوهش‌های هان و فلوروز، افزایش کنترل عبور مواد فعال بود. گروه پژوهشی مشابهی نیز تلاش کردند تا سرعت رهایش ترکیبات فعال را با تغییر در درجه اتصالات عرضی ماتریس پلیمری تنظیم کنند. میکرو و نانوکپسولی کردن ترکیبات غذایی نیز روش دیگری بود که برای رهایش کنترل شده عوامل فعال در کاربردهای غذایی ارائه شد. آنان درباره کاربرد میکروکپسول‌ها برای ترکیبات غذایی حساس مانند آنزیم‌ها پژوهش و پیشنهاد کردند، سرعت رهایش عامل فعال از کپسول‌های کوچکی که به طور مستقیم به غذا اضافه می‌شود را می‌توان با تغییر در مقدار pH، دما یا مقاومت یونی کنترل کرد. لاکوسته و همکاران استفاده از ترکیبات هوشمند را برای نسل جدید مواد بسته‌بندی با خواص رهایش کنترل شده پیشنهاد کردند [۵-۷]. آنان ادعا کردند، با این روش قادر به تغییر خواص شکل‌شناسی پلیمر و به دست آوردن محدوده وسیعی از خواص آزادسازی هستند.

از میان همه این روش‌ها، تنها فیلم‌های پلیمری چند لایه و اتصالات عرضی به‌عنوان مواد بسته‌بندی برای کنترل رهایش ترکیبات فعال از فیلم پلیمری به ماده غذایی، استفاده شده‌اند. عملی بودن سایر روش‌ها نیاز به آزمایش‌های وسیعی هم در محیط آزمایشگاهی و هم در محیط واقعی دارد. شکل ۱ نمایی از ساختار یک فیلم پلیمری چندلایه حاوی مواد ضد میکروب را نشان می‌دهد. ماده ضد میکروب در یک شبکه پلیمری قرار گرفته است و به تدریج به سمت ماده غذایی نفوذ می‌کند. لایه کنترل در کنترل سرعت نفوذ ماده ضد میکروب نقش بسزایی ایفا می‌کند [۵،۶،۸].

در این مقاله سعی شده است، پس از ارائه تاریخچه مختصری از فیلم‌های بسته‌بندی غذایی با خواص رهایش کنترل شده و انواع عوامل ضد میکروب استفاده شده، به بیان انواع سامانه‌های بسته‌بندی غذایی ضد میکروب، روش‌های تهیه و مدل‌های ارائه شده در این

جلوگیری می‌کند. اما هنگامی که با یک کی‌لیت کننده ترکیب شود، می‌تواند از رشد برخی باکتری‌های گرم منفی نیز جلوگیری به عمل آورد [۱۱].

لیزوزیم نیز یک آنزیم پپتیدی است که در منابع مختلفی مانند گیاهان، بزاق، اشک، سفیده تخم‌مرغ و بسیاری از انواع مایعات حیوانی و میکروارگانیسم‌ها یافت می‌شود و آبکافت اتصالات گلیکوزیدی در پپتید و گلیکان‌ها را بر عهده دارد. این آنزیم با آبکافت پیوندهای گلیکوزیدی در دیواره سلولی باکتری‌ها سبب حل شدن دیواره سلولی و از بین رفتن باکتری می‌شود [۱۲، ۱]. ترکیب لیزوزیم با EDTA اثر آن را روی باکتری‌های گرم منفی افزایش می‌دهد. لیزوزیم با دکستران، گالاکتومانان یا زایلوگلوکان در دمای متوسط ۵۰°C ترکیب می‌شود و فعالیت ضد میکروب خوبی در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی نشان می‌دهد [۱۳].

بونوکور و همکاران سیستیک رهایش لیزوزیم، نیسین و سدیم بنزوات را در PVOH که یک پلیمر بسیار متورم شونده است، بررسی کردند. آنها سرعت رهایش را با کنترل کردن درجه پلیمر شدن شبکه‌ای پلیمر با استفاده از گلی‌اکسال به‌عنوان عامل پلیمر شدن شبکه کنترل کردند. نتایج نشان داد، سرعت رهایش لیزوزیم و نیسین با تغییر درجه پلیمر شدن شبکه‌ای بستر پلیمری متغیر است. در حالی که برای کنترل سرعت رهایش سدیم بنزوات ساختار چندلایه‌ای مورد نیاز است [۱۴، ۲].

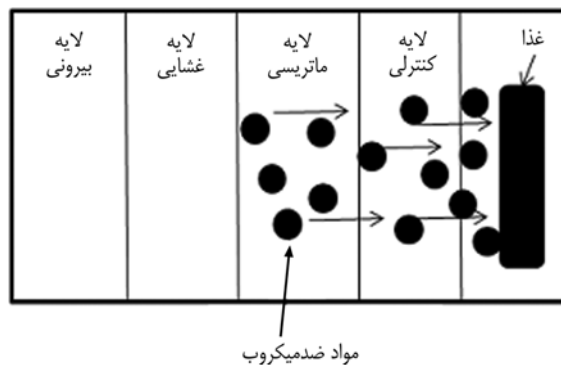
جدول ۱ برخی از عوامل ضد میکروب استفاده شده در مواد غذایی را به همراه نوع شبکه پلیمری و غذاهای استفاده شده نشان می‌دهد [۱۶، ۱۵، ۲].

انواع سامانه‌های بسته‌بندی غذایی ضد میکروب

بسته‌بندی‌های ضد میکروب از پرکاربردترین نوع بسته‌بندی‌های فعال است. این نوع بسته‌بندی‌ها قابلیت کشتن میکروارگانیسم‌ها را داشته یا از تخریب ماده غذایی به‌وسیله میکروارگانیسم‌های آلوده کننده ممانعت به عمل می‌آورند [۱۵].

سامانه‌های بسته - غذا

از این گونه سامانه‌ها می‌توان به محصولات گوشتی آماده و پنبه‌ها اشاره کرد. در این مدل، مواد بسته‌بندی در تماس مستقیم با سطح غذا قرار دارند. عامل اصلی انتقال در این سامانه، نفوذ ماده ضد میکروب از پوشش بسته‌بندی به ماده غذایی با پشت سر گذاشتن فصل مشترک تماس است. شکل ۲ نمایی از این سامانه را نشان می‌دهد که در آن بین ماده بسته‌بندی و غذا فاصله‌ای وجود ندارد و



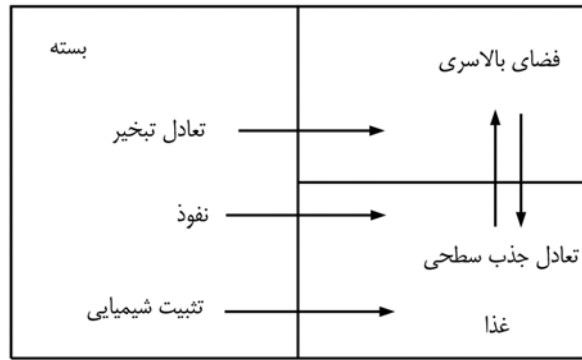
شکل ۱- ساختار چندلایه فیلم پلیمری بسته‌بندی حاوی مواد ضد میکروب [۹].

سامانه‌ها پرداخته شود.

عوامل ضد میکروب

عوامل ضد میکروب ترکیب شیمیایی یا طبیعی است که سبب از بین رفتن یا جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها می‌شوند و براساس نوع فعالیت معمولاً به ضد باکتری‌ها، ضد قارچ‌ها و ضد ویروس‌ها تقسیم می‌شوند. همچنین، برحسب آنکه از چه منبعی به دست آمده باشد، به دو دسته عوامل ضد میکروب شیمیایی و عوامل ضد میکروب طبیعی تقسیم می‌شوند. سدیم بنزوات و بنزوئیک اسید از جمله عوامل شیمیایی به شمار می‌آیند. بنزوئیک اسید از قدیمی‌ترین نگه‌دارنده‌های شیمیایی است که در لوازم آرایشی، داروها و صنایع غذایی استفاده می‌شود. سدیم بنزوات اولین نگه‌دارنده شیمیایی است که توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده برای مصارف غذایی استفاده شده است. در سال‌های اخیر، سوربیک اسید و نمک‌های محلول در آب آن، به ویژه پتاسیم سوربات که به‌عنوان سوربات‌ها شناخته شده‌اند، به طور گسترده‌ای در سرتاسر جهان به‌عنوان نگه‌دارنده‌های مواد غذایی، غذای حیوانات، داروسازی، لوازم آرایشی و سایر موارد استفاده شده‌اند. این دسته از مواد، نگه‌دارنده‌های بسیار خوبی هستند، زیرا رشد بسیاری از میکروارگانیسم‌ها همچون باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها را متوقف می‌کنند یا به تاخیر می‌اندازند [۱۰].

در سال‌های اخیر، با توجه به مفهوم سلامتی و افزایش آگاهی، مردم ترجیح می‌دهند تا غذاهایی را مصرف کنند که مواد نگه‌دارنده شیمیایی نداشته باشد. به همین دلیل، عوامل ضد میکروب طبیعی اهمیت زیادی یافته‌اند. نیسین یک ضد میکروب طبیعی پلی‌پپتیدی است که توسط لاکتوکوکوس لاکتیس (*Lactococcus lactis*) تولید می‌شود و به طور گسترده‌ای از رشد باکتری‌های گرم مثبت



شکل ۳- نمایی از سامانه بسته- فضای بالاسری- غذا [۱].

روش‌های تهیه بسته‌بندی غذایی ضد میکروب

برای تهیه بسته‌بندی‌های غذایی پیش‌گفته از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱،۲]:

- وجود بسته‌های کوچک حاوی عوامل ضد میکروب فرار درون بسته‌بندی،
- افزودن عوامل ضد میکروب فرار و غیر فرار مستقیماً درون پلیمرها،
- پوشش دادن یا جذب سطحی ضد میکروب‌ها روی سطوح پلیمر،
- ساکن کردن ضد میکروب‌ها در پلیمر با استفاده از پیوندهای یونی یا کووالانسی و
- استفاده از پلیمرهایی که ذاتاً خاصیت ضد میکروب دارند.

وجود بسته‌های کوچک حاوی عوامل ضد میکروب فرار درون

بسته‌بندی

افزودن بسته‌های کوچک حاوی عوامل فعال درون پوشش مواد غذایی موفق‌ترین کاربرد تجاری بسته‌بندی‌های ضد میکروب است. جاذب‌های اکسیژن و رطوبت و تولید کننده‌های بخار اتانول از مهم‌ترین انواع بسته‌ها هستند که به طور تجاری استفاده می‌شوند. جاذب‌های اکسیژن و رطوبت به طور خاص در صنایع نان، پاستا و بسته‌بندی‌های گوشت برای جلوگیری از اکسایش و میعان آب استفاده می‌شوند. اگرچه جاذب اکسیژن یا رطوبت یک عامل ضد میکروب نیست، با کاهش مقدار این دو در بسته غذایی از رشد میکروارگانیسم‌های هوازی، به ویژه قارچ‌ها، به شدت جلوگیری می‌کند [۱،۲].

افزودن عوامل ضد میکروب به ماده بسته‌بندی

افزودن عوامل ضد میکروب درون پلیمرها به طور صنعتی در دارورسانی و آفت‌کش‌ها، کالاهای خانگی، وسایل جراحی و پزشکی استفاده شده است. پژوهش‌ها درباره وجود ضد میکروب‌ها

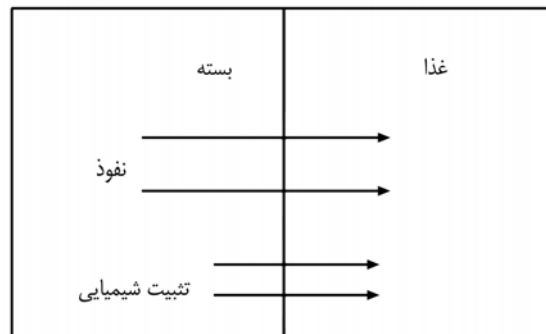
جدول ۱- عوامل ضد میکروب و مواد بسته‌بندی استفاده شده در بسته‌بندی‌های غذایی ضد میکروب [۱۶، ۱۵، ۲].

ماده غذایی	ماده بسته‌بندی	عامل ضد میکروب
پنیر	پلی اتیلن سبک	اسید آلی
سینه مرغ	نشاسته-گلیسرول	پتاسیم سوربات
نان	کاغذ-کربوکسی متیل سلولوز	کلسیم سوربات
آب	کیتوسان	پروپیونیک اسید
آب	کیتوسان	استیک اسید
فیله مرغ	پلی اتیلن	بنزوات اسید انیدرید
فلفل	پلی اتیلن سبک	پپتید-پروتئین-آنزیم
پنیر	پلی اتیلن سبک	لیوزیم
		لیوزیم
ماهی	آلژینات	الکل-تیئول
		اتانول

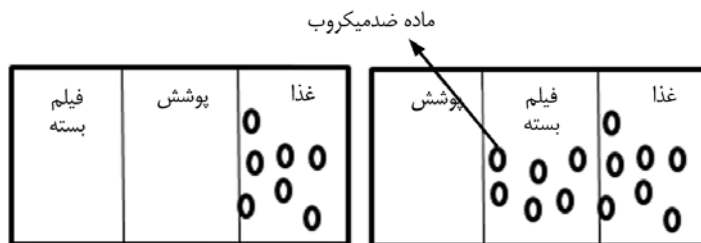
ماده ضد میکروب پس از نفوذ از بسته روی غذا قرار می‌گیرد [۱،۱۵].

سامانه‌های بسته- فضای بالاسری- غذا

نمونه‌هایی از این نوع سامانه‌ها، بسته‌های انعطاف‌پذیر، بطری‌ها، قوطی‌ها و کارتن‌های مواد غذایی هستند. در این سامانه‌ها عوامل ضد میکروب باید فرار باشند تا بتوانند از فضای بالاسری درون بسته مهاجرت کنند. شکل ۳ نمایی از این نوع سامانه‌ها را نشان می‌دهد [۱،۱۵].



شکل ۲- نمایی از سامانه‌های بسته- غذا [۱].



شکل ۴- اثر محل پوشش ضد میکروب روی نفوذ عوامل ضد میکروب [۱۵].

پلیمرهای با خاصیت ذاتی ضد میکروب

پلیمرهای ضد میکروب دسته‌ای از پلیمرها با فعالیت ضد میکروب هستند که قابلیت جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها مثل باکتری‌ها و قارچ‌ها را دارا هستند. این پلیمرها بر اساس الگوی گرفته شده از پتیده‌های ضد میکروب موجود در سامانه ایمنی موجودات زنده طراحی و ساخته شده‌اند که برای از بین بردن باکتری‌ها استفاده می‌شوند. به طور کلی، پلیمرهای ضد میکروب با پیوند یا جایگزینی عامل ضد میکروب در یک پایه پلیمری با استفاده از پیوند آلکیلی یا استیلی تولید می‌شوند. پلیمرهای ضد میکروب می‌توانند سبب افزایش بازدهی و گزینش‌پذیری عوامل ضد میکروب به کار رفته شوند. این پلیمرها اغلب غیر فرار و از نظر شیمیایی پایدارند. پلیمرهای ضد میکروب اغلب از راه فرایندی که در شکل ۵ نشان داده شده است، سبب از بین رفتن باکتری می‌شوند. مطابق شکل، در مرحله اول پلیمر جذب دیواره سلولی باکتری می‌شود. اکثر باکتری‌ها دارای سطوحی با بار منفی هستند، بنابراین پلیمرهای

جدول ۲- عوامل ضد میکروب و پلیمرهای حمایت کننده آنها [۲].

مواد ضد میکروب	فیلم‌های پلیمری حمایت کننده
بنومیل بنزوئیل کلرید باکتریوسین	یونی
لیزوزیم پتیده‌های ضد میکروب ترکیبی	پلی استیرن
لیزوزیم لیزوزیم لیزوزیم نیسین	پلی وینیل الکل رزین‌های نایلون ۶ و ۶ سلولوز تری استات پلی اتیلن - پلی آمید

در بسته‌بندی‌های غذایی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. افزودن ضد میکروب‌ها به پلیمر مذاب یا محلول پلیمری مرطوب دو روش افزودن عوامل ضد میکروب به مواد بسته‌بندی است [۱،۲]. اگر عامل ضد میکروب اضافه شده غیر فرار باشد، مواد بسته‌بندی باید با سطح غذا تماس یابند تا عامل ضد میکروب به سطح آن نفوذ یابد. اگر عوامل ضد میکروب اضافه شده فرار باشند، نیازی نیست که مواد بسته‌بندی با سطح غذا تماس یابند [۵،۱۷].

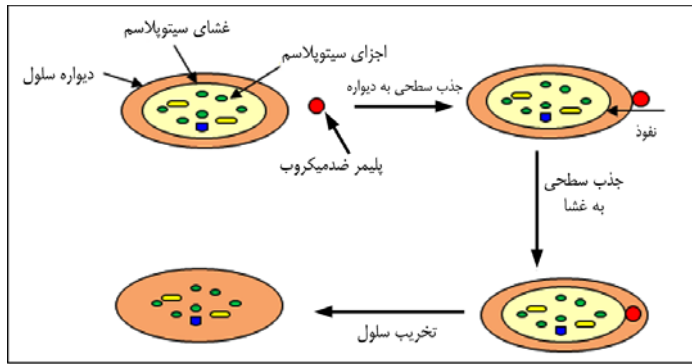
پوشش دادن یا جذب سطحی عوامل ضد میکروب روی سطوح پلیمری

مواد ضد میکروب که به دمای زیاد حساس‌اند، نمی‌توانند در فرایندهای پلیمری استفاده شوند. از این رو در بیشتر موارد، به شکل پوشش به سطوح پلیمری اضافه می‌شوند. برای مثال، می‌توان به پروتئین‌ها اشاره کرد که به دلیل داشتن ساختار دوگانه آبدوست و آبگریز، قابلیت زیادی برای جذب سطحی دارند. پوشش‌های نیسین - متیل سلولوز روی فیلم‌های پلی اتیلن نمونه‌ای از این نوع مواد اند [۲].

شکل ۴ اثر محل پوشش را روی نفوذ عوامل ضد میکروب نشان می‌دهد. در شکل ۴-الف دیده می‌شود، ماده ضد میکروب باید ابتدا از فیلم پلیمری بسته‌بندی عبور کند و سپس به سطح ماده غذایی نفوذ کند. اما در شکل ۴-ب پوشش ضد میکروب بین بسته و ماده غذایی قرار گرفته است. در این حالت، ماده ضد میکروب تنها از لایه ضد میکروب عبور کرده و به سطح ماده غذایی نفوذ می‌کند.

پیوندهای یونی یا کووالانسی بین عوامل ضد میکروب و پلیمرها

پتیده‌ها، آنزیم‌ها، پلی آمین‌ها و اسیدهای آلی نمونه‌هایی از عوامل ضد میکروب دارای گروه‌های عاملی مناسب برای پیوندهای یونی یا کووالانسی هستند. از پلیمرهای دارای گروه‌های عاملی نیز می‌توان به اتیلن وینیل استات (EVA)، اتیلن متیل آکریلات (EMA)، نایلون و پلی استیرن (PS) اشاره کرد. جدول ۲ عوامل ضد میکروب و پلیمرهای حمایت کننده آنها را نشان می‌دهد [۲].



شکل ۵- نمایی از تخریب سلول باکتری به وسیله پلیمر ضد میکروب [۱۸].

محلول از قانون دوم فیک ارائه شده توسط کرانک پیروی می‌کند. در فرضیه دوم، انتقال هم در فیلم پلیمری بسته‌بندی و هم در غذا در نظر گرفته می‌شود. این روش برای ساختارهای سه‌لایه‌ای تعمیم یافته است که شامل لایه غشایی ضد میکروب خارجی، لایه ماتریسی و غذا نیز هستند [۱۹].

چوبی و سایرین از تقریب اول برای یافتن ضریب نفوذ پتاسیم سوربات در فیلم ضد میکروب بر پایه فیلم K-carrageenan در pH و دماهای متفاوت استفاده کردند [۲۰، ۱۲]. طبق این تقریب رهاش جزئی ماده فعال با زمان از معادله زیر پیروی می‌کند [۱۹]:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{L^2}\right] \quad (1)$$

در زمان‌های کوتاه که $t \rightarrow 0$ معادله (۱) به شکل معادله (۲) ساده می‌شود:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{D t}{L^2}\right)^{1/2} \quad (2)$$

در زمان‌های کوتاه، نمودار جزء مصرف شده به شکل خطی است. بنابراین، آنها ضریب نفوذ را از شیب ناحیه خطی منحنی M_t/M_∞ بر حسب $t^{0.5}$ به شکل زیر محاسبه کردند [۱۷]:

$$D = \left(\frac{k l}{4}\right)^2 \pi \quad (3)$$

که در آن k شیب اولیه را نشان می‌دهد.

شکل ۶ نتایج تجربی و نظری رهاش جرمی را در 25°C و مقادیر pH متفاوت نشان می‌دهد. از روی شکل می‌توان به اختلاف بین داده‌های تجربی و نظری پی برد. بنابراین، نتایج به خوبی نشان می‌دهد، مدل ریاضی ارائه شده با معادله (۱) بر پایه حذف انتقال

کاتیونی نسبت به آنیونی جذب بهتری نشان می‌دهند [۱۸]. در مرحله بعد، عامل ضد میکروب باید از دیواره سلولی نفوذ کند و جذب سطحی روی غشای سیتوپلاسمی اتفاق افتد. مولکول‌های ضد میکروب کوچک در مقایسه با پلیمرها مرحله نفوذ را بهتر طی می‌کنند. این در حالی است که پلیمرها در مرحله جذب سطحی موفق‌تر از آنها هستند. تخریب غشای سیتوپلاسمی و در نتیجه از بین رفتن اجزای سیتوپلاسمی سبب مرگ سلول می‌شود [۱۸]. از خانواده پلیمرهای کاتیونی می‌توان به کیتوسان و پلی-L-لیزین اشاره کرد. این ترکیبات ذاتاً خاصیت ضد میکروب دارند و در فیلم‌ها و پوشش‌ها استفاده می‌شوند. کیتوسان اخیراً به عنوان ترکیب غذایی توسط سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA) مورد تایید قرار گرفته است [۲، ۱].

مدل‌های ارائه شده برای سامانه‌های بسته‌بندی غذایی

مدل‌سازی انتقال ماده فعال از فیلم پلیمری بسته‌بندی به غذا بسیار مفید است. چرا که با بررسی مدل امکان محاسبه ضریب نفوذ ماده فعال در فیلم پلیمری به دست می‌آید و از این راه می‌توان نیم‌رخ غلظت را در فیلم پلیمری محاسبه کرد. در این حالت، مدت زمانی که ماده فعال غلظتی بیش از غلظت بحرانی دارد تا خاصیت جلوگیری کننده خود را حفظ کند، قابل پیش‌بینی خواهد بود.

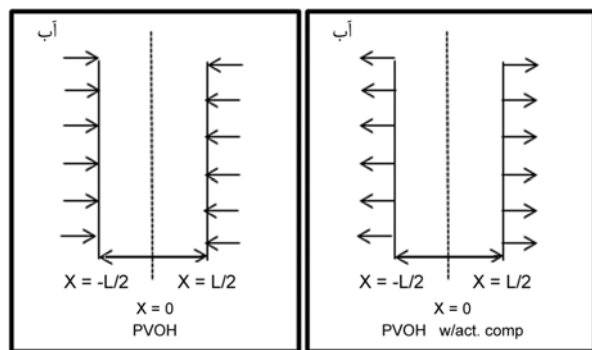
جانگ هان در سال ۲۰۰۸ سامانه دولایه بسته- غذا را به عنوان سامانه مدل در نظر گرفت. در این سامانه غذای جامد یا مایع یا غذای گرانرو در تماس مستقیم با ماده بسته بندی قرار داشت. برای توضیح انتقال جرم در این سامانه او دو فرضیه را پیشنهاد داد. در فرضیه اول، نفوذ ماده فعال در فیلم پلیمری بسته‌بندی بسیار کوچک‌تر از نفوذ در فیلم پلیمری بوده و حجم لایه غذا بسیار بزرگتر از حجم فیلم پلیمری بسته‌بندی است. بنابراین، نفوذ عامل فعال از فیلم پلیمری به حجم شبه‌نامحدود در نظر گرفته می‌شود و

بنزوات) از پلی‌وینیل الکل با پیوندهای عرضی (PVOH) به آب ارائه کرد. مدل شامل ۳ مرحله می‌شود: نفوذ آب به فیلم پلیمری، نفوذ متقابل (counter diffusion) عامل ضد میکروب از فیلم به آب، تورم و استراحت شبکه پلیمری [۷، ۱۴]. پارامترهای مدل در ابتدا از راه آزمایش تورم تعریف می‌شوند که در آن آب به فیلم‌های PVOH نفوذ می‌کند، بدون آنکه عامل ضد میکروب درون فیلم وجود داشته باشد. سپس، سینتیک رهایش عوامل ضد میکروب از فیلم اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۷ این مطلب را نشان می‌دهد [۱۴، ۷].

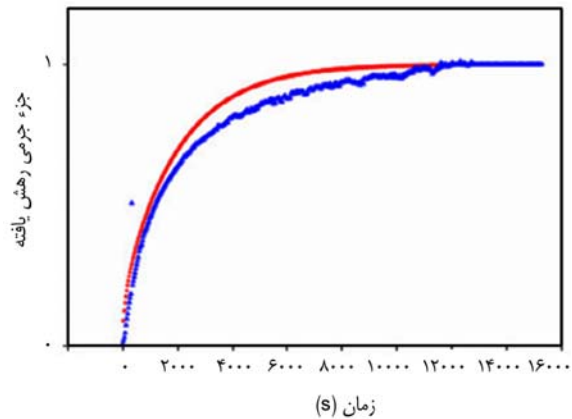
مدل به همان اندازه که در تطبیق سینتیک جذب آب با داده‌های تجربی موفق بود (شکل ۸)، در توصیف سینتیک رهایش عوامل ضد میکروب، لیزوزیم، نیسین و سدیم بنزوات نیز موثر بود. مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی سینتیک جذب و داده‌های نظری برای عامل ضد میکروب لیزوزیم در شکل ۹ نشان داده شده است. آزمایش‌های با چهار نوع مختلف فیلم با استفاده از مقادیر متفاوت عامل ایجاد کننده پیوندهای عرضی، گلی اکسال، تهیه و انجام شد. نفوذ و ضرایب تفکیک عوامل ضد میکروب در این فیلم‌ها طبق داده‌های تجربی و نتایج مدل در جدول ۳ آمده است. نتایج نشان می‌دهد، هنگامی که با افزایش درجه پیوندهای عرضی، ضرایب نفوذ ترکیب فعال کاهش یافته، در حالی که ضرایب تفکیک افزایش می‌یابد [۷، ۱۴].

در مطالعه‌ای که توسط هانوسوا و همکاران در سال ۲۰۰۹ در دانشکده فناوری غذا و گوشت در پراگ انجام شده است، اثر فیلم‌های بسته‌بندی پلی‌اتیلنی پوشش یافته با پوشش حاوی نیسین و/ یا ناتامایسین روی پایداری میکروبی پنیرهای بسته‌بندی شده بررسی شد [۲۱]. همچنین، فیلم‌های پلی‌اتیلن یا سلوفان‌های پوشش یافته با لاکتیک اسید، سدیم لاکتات و نیسین روی پایداری میکروبی گوشت مرغ خام بررسی شدند [۲۱].

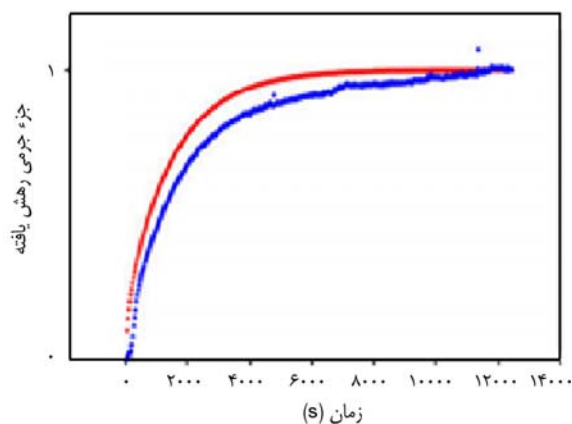
نتایج نشان داد، سامانه‌های فعال بسته‌بندی غذا بر پایه رهایش



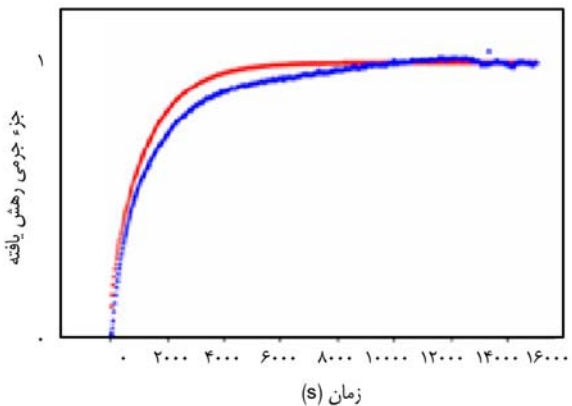
شکل ۷- سامانه‌های مدل نفوذ: (الف) ترکیب فعال و (ب) آب [۱].



(الف)



(ب)

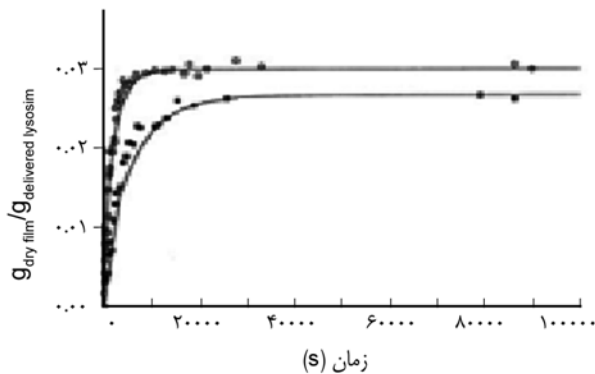


(ج)

شکل ۶- داده‌های تجربی و نظری رهایش جرمی جزئی پتاسیم سوربات در ۲۵°C و pH: (الف) ۳/۸، (ب) ۵/۲ و (ج) ۷ [۱۹].

جرم در محیط غذا برای تصحیح داده‌های تجربی مناسب نیست [۱۷، ۲۰].

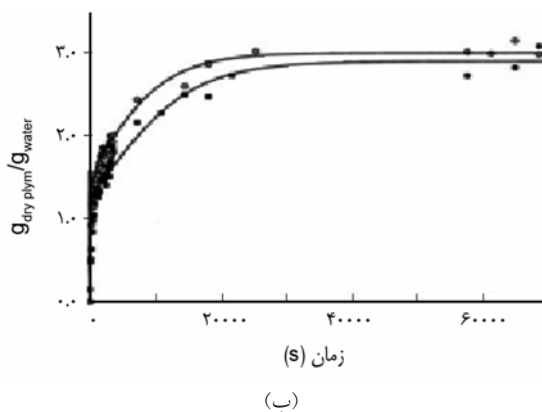
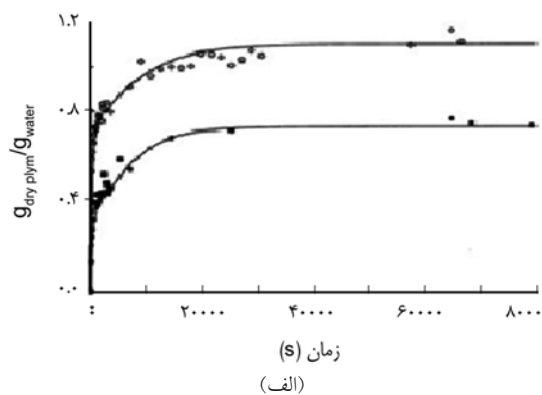
در مطالعه‌ای دیگر، بونوکور یک مدل ریاضی را برای توصیف سینتیک رهایش عوامل ضد میکروب (لیزوزیم، نیسین و سدیم



شکل ۹- مقدار لیزوزیم رها شده بر حسب تابعی از زمان در دو فیلم A و B [۱].

در پژوهشی دیگر که در دانشگاه از میر ترکیه توسط سپهون جمیلی انجام شد، تقارن و تخلخل فیلم‌های سلولوز استات برای کاربردهای بسته‌بندی غذایی و امکان استفاده از آنها در کنترل سرعت رهائش ماده فعال لیزوزیم بررسی شدند. در این مطالعه، فیلم‌های متخلخل و چگال سلولوز استات را با عوامل ضد میکروب لیزوزیم و EDTA درهم آمیخته و رهائش عوامل فعال را از هر دو سطح به دست آورده و مقایسه کردند. در نهایت، اثر رهائش کنترل شده عامل ضد میکروب را روی رشد باکتری‌های E-coli بررسی کردند [۱، ۲۲]. نتایج نشان داد، سرعت رهائش لیزوزیم از فیلم‌ها با تغییر ترکیب محلول اولیه تغییر می‌کند. سرعت‌های رهائش، بیشترین فعالیت لیزوزیم آزاد شده و فعالیت‌های ضد میکروب با افزایش مقدار سلولوز استات در محلول کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد، استفاده از فیلم‌های پلیمری متخلخل متقارن حاوی عوامل ضد میکروب را به عنوان مواد بسته‌بندی غذایی با خواص رهائش کنترل شده پیشنهاد کرد [۲۲].

در مطالعه دیگری که در دانشگاه پلی تکنیک ویرجینیا انجام شد، روش جدیدی برای کنترل رهائش مواد از فیلم پلیمری ارائه

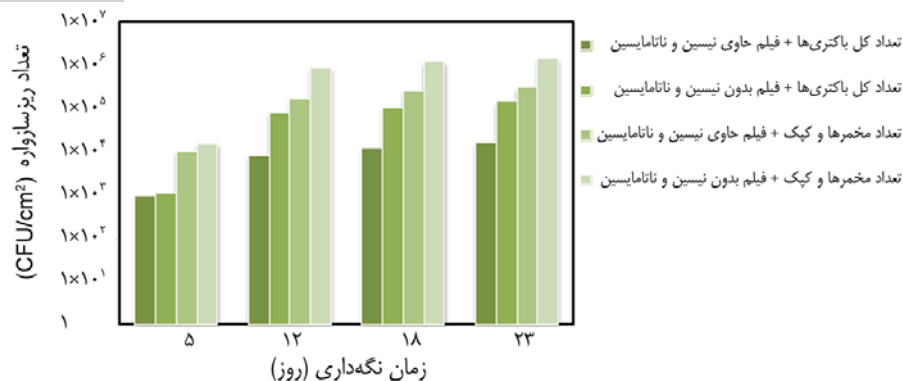


شکل ۸- نسبت تورم به شکل تابعی از زمان و بهترین تطبیق مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی در دو فیلم: (الف) A و B و (ب) C و D [۱].

عوامل ضد میکروب از پلیمر یا سلوفان، از تعداد میکروارگانیسم‌ها نمی‌کاهد، بلکه رهائش عوامل ضد میکروب سبب کاهش سرعت رشد میکروارگانیسم‌ها طی فرایند ذخیره‌سازی می‌شود. شکل ۱۰ تغییرات تعداد میکروارگانیسم‌ها را روی سطح پنیر مورد نظر در فیلم‌های بسته‌بندی با عامل ضد میکروب و بدون آن نشان می‌دهد [۲۱].

جدول ۳- مقادیر ضرایب نفوذ و ضریب تفکیک ماده فعال [۱].

سدیم بنزوات (SB)		نیسین (N)		لیزوزیم (L)		درصد وزنی عامل پیوند عرضی	فیلم
K_{SB}	$D_F^{SB} (cm^2/s)$	K_N	$D_F^N (cm^2/s)$	K_L	$D_F^L (cm^2/s)$		
۵۵/۸۲	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۸}$	۱۵۲/۸۰	$۳/۰۱ \times ۱۰^{-۱۰}$	۴۳/۳۷	$۳/۸۳ \times ۱۰^{-۱۱}$	۷/۷۰۰	A
۶۰/۰۱	$۴/۲۰ \times ۱۰^{-۸}$	۶۷/۵۸	$۳/۱۶ \times ۱۰^{-۹}$	۴۵/۶۲	$۲/۴۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	۲/۰۰۰	B
۲۵/۹۶	$۲/۵۵ \times ۱۰^{-۸}$	۳۴/۵۷	$۶/۲۴ \times ۱۰^{-۹}$	۱۵/۰۶	$۲/۱۰ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷۷۰	C
۲۱/۳۹	$۲/۵۴ \times ۱۰^{-۸}$	۲۶/۷۳	$۸/۶۱ \times ۱۰^{-۹}$	۶/۳۳	$۹/۹۸ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۰۷۷	D

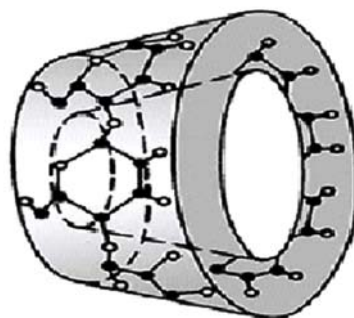


شکل ۱۰- تغییرات تعداد میکروارگانیسم‌های رشد یافته روی پنیر در بسته‌بندی‌های حاوی عامل ضد میکروب و بدون آن [۲۱].

نتیجه‌گیری

نیاز به تهیه شدن آسان، به حداقل رساندن فرایندها و آماده بودن برای خوردن محصولات غذایی تازه، جهانی شدن بازار غذا و توزیع چالش‌های اساسی را برای امنیت و کیفیت غذا می‌طلبد. بیماری‌های میکروبی اخیر ناشی از مواد غذایی، همگان را به سمت راه‌های جدید پیشگیری از رشد میکروب‌ها در حین حفاظت کیفیت، تازگی و امنیت غذا سوق می‌دهد. یکی از این راه‌ها استفاده از بسته بندی‌هایی است که کیفیت و امنیت غذا را افزایش می‌دهد. نسل جدید بسته‌بندی‌های غذایی می‌تواند شامل موادی با خواص ضد میکروب باشد. بسته‌بندی‌های ضد میکروب، شکلی از بسته‌بندی‌های فعال هستند. بسته‌بندی‌های فعال برای رسیدن به هدف مورد انتظار با محصول یا فضای بین بسته و سامانه غذایی در تماس است. به عبارت دیگر، بسته‌بندی‌های غذایی ضد میکروب برای کاهش، جلوگیری یا توقف رشد میکروارگانیسم‌هایی عمل می‌کنند که ممکن است در غذای بسته بندی شده یا مواد بسته‌بندی موجود باشند. سامانه‌های بسته‌بندی فعال بر پایه مواد بسته‌بندی ترکیب شده با مواد ضد میکروب یکی از اتفاقات مهم و جهت یافته در صنایع غذایی است. بسته بندی غذایی ضد میکروب کاهش دهنده، جلوگیری کننده یا تاخیر اندازنده رشد میکروارگانیسم‌هایی است که ممکن است در سطح غذای بسته بندی شده وجود داشته باشد. این سامانه‌ها سبب افزایش عمر نگهداری، بهبود کیفیت نگهداری و پایداری ذخیره سازی ماده غذایی شوند. بسته‌بندی‌های ضد میکروب در میان پژوهشگران و صنعت علاقه‌مندان بسیاری دارد. در حال حاضر، پژوهش‌ها در زمینه مواد جدید پلیمری و ضد میکروب‌ها بسیار محدود است. مواد جدید پوشش دهنده و متصل کننده سازگار با پلیمرها و ضد میکروب‌ها، سطوح تغییر یافته و

شده است. ضد اکسندگی‌های شیمیایی به طور مستقیم به غذا اضافه می‌شوند تا از اکسایش چربی‌ها و تولید رادیکال‌های آزاد جلوگیری کنند. ضد اکسندگی‌های طبیعی تغییرات بیشتری در کاهش فعالیت اکسایش انجام می‌دهند. بنابراین، نیاز به گسترش و طراحی بسته‌بندی‌های فعالی وجود دارد که ضد اکسندگی‌ها را در یک رفتار کنترل شده آزاد می‌کنند. در این پژوهش، ترکیبات سیکلودکسترین را با ضد اکسندگی‌های طبیعی α -tocopherol و quercetin آمیخته و ترکیب حاصل را به پلیمر پلی اتیلن سبک خطی افزوده‌اند. سپس، مقدار رهایش ضد اکسندگی‌های طبیعی را از فیلم پلیمری به سامانه غذایی مدل اندازه‌گیری کرده‌اند. برای بهبود آزادسازی موثر غلظت ضد اکسندگی به سطح غذا و محدود کردن فرایند اکسایش در سطح، افزایش کیفیت محصول و عمر نگهداری آن، از فرایند کپسولی کردن مولکولی ضد اکسندگی طبیعی با استفاده از سیکلودکسترین استفاده شده است. کپسولی کردن به عنوان سازوکار کنترل رهایش درون فیلم پلیمری در نظر گرفته شده است [۲۳]. شکل ۱۱ نمایی از مولکول مخروطی شکل سیکلودکسترین برای به دام انداختن ترکیبات فعال را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- شکل مخروطی مولکول β -سیکلودکسترین که قابلیت کپسولی کردن ترکیبات مهمان فعال را به طور مولکولی دارد [۲۳].

غیرگرمایی مثل فشار زیاد که سبب کاهش آلودگی های پاتوزنی می‌شوند، در افزایش عمر نگهداری محصولات خوراکی نیز موثر باشند.

هدفمند برای ایجاد پیوندهای کووالانسی و یونی و روش‌های جدید کپسولی کردن، نمونه‌هایی از فناوری‌هایی هستند که در گسترش بسته‌بندی‌های ضد میکروب نقش ایفا می‌کنند. بسته‌بندی‌های ضد میکروب می‌توانند در کنار سایر فرایندهای

مراجع

- Gemili S., *Preparation and Characterization of Antimicrobial Polymeric Films for Food Packaging Applications*, MSc Thesis, Izmir Institute of Technology, July 2007.
- Appendini P. and Hotchkiss J.H., Review of Antimicrobial Food Packaging, *Inn. Food Sci. Emerging Tech.*, **3**, 113-126, 2002.
- Arifin D.Y., Lee L.Y., and Wang C.H., Mathematical Modeling and Simulation of Drug Release From Microspheres: Implications to Drug Delivery Systems, *Adv. Drug Deliv. Rev.*, **58**, 1274-1325, 2006.
- Brayden D.J., Controlled Release Technologies for Drug Delivery, *Drug Discovery Today*, **8**, 976-978, 2003.
- Buonocore G.G., Conte A., Corbo M.R., Sinigaglia M., and Nobile M.A., Mono and Multilayer Active Films Containing Lysozyme as Antimicrobial Agent, *Inn. Food Sci. Emerging Tech.*, **6**, 459-464, 2005.
- Buonocore G.G., Nobile M.A., Panizza A., Bove S., and Nicolas L., Modeling the Lysozyme Release Kinetics From Antimicrobial Films Intended for Food Packaging Applications, *J. Food Sci.*, **68**, 1365-1370, 2003.
- Buonocore G.G., Nobile M.A., Panizza A., Corbo M.R., and Nicolais L., A General Approach to Describe The Antimicrobial Agent Release from Highly Swellable Films Intended for Food Packaging Applications, *J. Controlled Release*, **90**, 97-107, 2003.
- Amparo L.R., Rafael G., and Lagaron J.M., Bioactive Packaging: Turning Foods into Healthier Foods Through Biomaterials, *Trends Food Sci. Tech.*, **17**, 567-575, 2006.
- Ozdemir M. and Floros J.D., Active Food Packaging Technologies, *Critical Rev. Food Sci. Nutrition*, **44**, 185-193, 2004.
- Davidson P.M. and Branan A.L., *Antimicrobials in Foods*, Marcel Dekker, New York, 11-48, 1993.
- Dawson P.L., Harmon L., Sotthibandhu A., and Han I.Y., Antimicrobial Activity of Nisin-Adsorbed Silica and Corn Starch Powders, *Food Microbiol.*, **22**, 93-99, 2005.
- Branan J.K. and Davidson P.M., Enhancement of Nisin, Lysozyme, and Monolaurin Antimicrobial Activities by Ethylene diamine tetra acetic Acid and Lactoferrin, *Int. J. Food Microbiol.*, **90**, 63-74, 2004.
- Conte A., Buonocore G.G., Sinigaglia M., and Del Nobile M.A., Development of Immobilized Lysozyme Based Active Film, *J. Food Eng.*, **78**, 741-745, 2007.
- Buonocore G.G., Sinigaglia M., Corbo M.R., Bevilacqua A., La Notte E., and Del Nobile M.A., Controlled Release of Antimicrobial Compounds From Highly Swellable Polymers, *J. Food Product.*, **67**, 1190-1194, 2004.
- Han J.H., Antimicrobial Food Packaging, *Food Technol.*, **54**, 56-65, 2000.
- Appendini P. and Hotchkiss J.H., Immobilization of Lysozyme on Food Contact Polymers as Potential Antimicrobial Films, *Packaging Tech. Sci.*, **10**, 271-279, 1997.
- Choi J.H., Choi W.Y., Cha D.S., Chinnan M.J., Park H.J., Lee D.S., and Park J.M., Diffusivity of Potassium Sorbate in K-carrageenan Based Antimicrobial Film, *LWT Food Sci. Technol.*, **38**, 417-423, 2005.
- El-Refai K., Worley S.D., and Broughton R., The Chemistry and Applications of Antimicrobial Polymers: A State of the Art Review, *Biomacromolecules*, **8**, 1359-1384, 2007.
- Crank J., *The Mathematics of Diffusion*, Oxford University, New York, 2nd ed., 41, 1975.
- Cha D.S., Choi J.H., Chinnan M.S., and Park H.J., Antimicrobial Films Based on Na-alginate and K-carragenan, *Lebensm. Wiss. Technol.*, **35**, 715-719, 2002.
- Hanusova K., Dobias J., and Klaudivs Ova K., Effect of Packaging Films Releasing Antimicrobial Agents on Stability of Food Products, *Czech J. Food Sci.*, Special Issue, 27, 2009.
- Cardinal J.R., Herbig S.M., Korsmeyer R.W., Lo J., Smith K.L., and Avinash G., Use of Asymmetric-Membranes in Delivery Devices, *US Pat. 5,612,059*, 1997.
- Koontz J.L., Controlled Release of Active Ingredients from Food and Beverage Packaging, Italian Packaging Technology Award (IPTA) Paper Competition, 2006.