Journal of Packaging Science and Technology

Vol. 14, No. 4, Winter, 2024

Investigating Types of Antimicrobial Packaging Systems

Samaneh Faraji Kafshgari, Mohammad Javad Akbarian Meymand*, Masoud Habibi Najafi

* Ph.D. Food Science and Industry, Malayer Raisin and Grape Research Institute, Malayer, Iran

(Received: 16/09/2023; Accepted: 17/01/2024)

Abstract

Passive packaging has an almost neutral mechanism in dealing with external and internal packaging factors such as gas penetration, cellular respiration and gas production, water loss or gain, ethylene production, production of oxidation compounds and possibly microbial contamination of food. While active packaging, by changing the packaging conditions, increases the shelf life of packaged food and improves its safety and sensory characteristics, while maintaining the quality of food. Among the types of active packaging applications, antimicrobial packaging is one of the most common technological applications of active packaging. Antimicrobial packaging is a system that is able to destroy or inhibit the growth of microorganisms and thereby increases the shelf life and safety level of food products. In antimicrobial packaging, the activity of an antimicrobial agent is carried out through the contact of the microorganism with the inner surface of the packaging material or the gradual release of the antimicrobial agent from the packaging material to the food. The controlled release of antimicrobial substances during the shelf life of food improves the safety of food and increases its shelf life. Antimicrobial substances increase the shelf life of food products by slowing down the growth rate and prolonging the lag phase of microorganisms or by inactivating and destroying them. Antimicrobial agents may be of natural or unnatural origin. The origin of natural antimicrobial substances can be plant, animal or microbial. In the design of antimicrobial systems, in addition to the characteristics of antimicrobial substances, the methods of adding antimicrobial substances, their penetration and evaporation, and many other factors such as the resistance of microorganisms, controlled release, release mechanisms, the chemical nature of antimicrobial substances and Foodstuffs, storage and distribution conditions, physical and mechanical properties of antimicrobial packaging materials, organoleptic properties and toxicity of antimicrobial materials should also be taken into consideration.

Keywords: Active Packaging, Antimicrobial Packaging, Shelf Life, Antimicrobial Materials

*Corresponding Author E-mail: j.akbarian67@gmail.com

نشریه علمی «علوم و فنون بسته‌بندی»
سال چهاردهم، شماره ۵۶، زمستان ۱۴۰۲؛ ص ۷۸-۶۳

علمی – ترویجی

بررسی انواع سامانه‌های بسته‌بندی ضد میکروبی

سمانه فرجی کفشگری[۱]، محمد جواد اکبریان میمند[۲*]، مسعود حبیبی نجفی[۳]

۱- دکتری تخصصی علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم پزشکی اسدآباد، اسدآباد، ایران ۲- دکتری تخصصی علوم و صنایع غذایی، پژوهشکده انگور و کشمش، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران ۳- دکتری تخصصی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷)

چکیده

بسته‌بندی غیر فعال سازوکاری تقریباً خنثی در مقابله با عوامل خارجی و داخلی بسته‌بندی نظیر نفوذ گازها، تنفس سلولی و تولید گاز، از دست دادن یا گرفتن آب، تولید اتیلن، تولید ترکیبات حاصل از اکسیداسیون و احتمالاً آلودگی میکروبی مواد غذایی دارد. در حالی‌که بسته‌بندی فعال با تغییر شرایط بسته‌بندی، عمر انباری مواد غذایی بسته‌بندی شده را افزایش داده و ایمنی و خصوصیات حسی آن‌را بهبود می‌بخشد و در عین حال کیفیت مواد غذایی را حفظ می‌کند. در میان انواع کاربردهای بسته‌بندی فعال، بسته‌بندی ضد میکروبی از رایج‌ترین کاربردهای فناوری بسته‌بندی فعال است. بسته‌بندی ضد میکروبی، سامانه‌ای است که قادر به از بین بردن یا بازداری رشد میکروارگانیسم‌ها است و از این طریق ماندگاری و سطح ایمنی محصولات غذایی را افزایش می‌دهد. در بسته‌بندی ضد میکروبی، فعالیت یک عامل ضد میکروبی از طریق تماس میکروارگانیسم با سطح داخلی مواد بسته‌بندی و یا انتشار تدریجی عامل ضد میکروبی از مواد بسته‌بندی به غذا انجام می‌شود. رهایش کنترل شده مواد ضد میکروبی در طول دوره ماندگاری غذا، موجب بهبود ایمنی مواد غذایی شده و ماندگاری آن‌را افزایش می‌دهد. مواد ضد میکروبی از طریق کاهش سرعت رشد و طولانی کردن فاز تأخیری میکروارگانیسم‌ها یا غیرفعال کردن و نابودی آن‌ها، باعث افزایش ماندگاری فرآورده‌های غذایی می‌شوند. مواد ضدمیکروبی ممکن است منشأ طبیعی یا غیر طبیعی داشته باشند. منشأ مواد ضد میکروبی طبیعی می‌تواند گیاهی، حیوانی یا میکروبی باشد. در طراحی سامانه‌های ضد میکروبی علاوه بر خصوصیات مواد ضد میکروبی، روش‌های افزودن مواد ضد میکروبی، نفوذ و تبخیر آن‌ها و بسیاری از پارامترهای دیگر از جمله مقاومت میکروارگانیسم‌ها، رهایش کنترل شده، سازوکارهای رهایش، ماهیت شیمیایی مواد ضد میکروبی و مواد غذایی، شرایط نگهداری و توزیع، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد بسته‌بندی ضد میکروبی، خواص حسی و سمیت مواد ضد میکروبی را نیز باید مد نظر قرار داد.

کلیدواژه‌ها: بسته‌بندی فعال، بسته‌بندی ضد میکروبی، ماندگاری، مواد ضد میکروبی.

۱- مقدمه

بسته‌بندی مواد غذایی برای زندگی مدرن ضروری است زیرا ضمن حفظ کیفیت مواد غذایی، ارائه اطلاعات و راحتی مصرف‌کننده، از محصولات غذایی که برای مسافت‌های طولانی حمل می‌شوند نیز محافظت می‌کند. تولید مواد غذایی فرآوری شده بدون بسته‌بندی غیر قابل تصور خواهد بود. بنابراین بسته‌بندی به یکی از بزرگ‌ترین صنایع در جهان تبدیل شده است [۱].

بسته‌بندی به معنی ظرف، محافظ یا سامانه‌ای است که سلامت کالای مورد نظر را در فاصله تولید تا مصرف حفظ نموده و آن را از عوامل فیزیکی، شیمیایی و میکروبی مخرب و تغییرات نامطلوب مصون نگه می‌دارد.

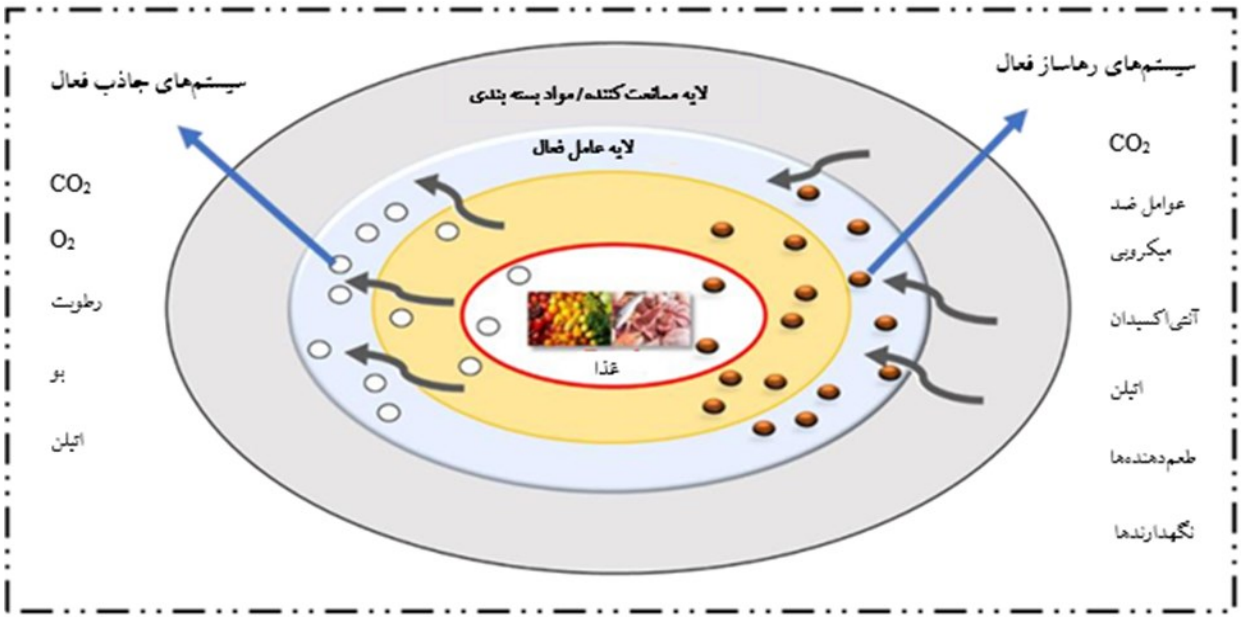
بسته‌بندی یکی از مهم‌ترین فرآیندها جهت حفظ کیفیت محصولات غذایی درحین انبارداری، انتقال و مصرف نهایی بوده و از تنزل کیفیت جلوگیری می‌کند و توزیع و بازاریابی را تسهیل می‌نماید. وظایف اصولی بسته‌بندی؛ محافظت، نگهداری (افزایش طول عمر)، اطلاع‌رسانی، بازاریابی و توزیع است. بسته‌بندی مناسب، نه تنها کیفیت غذا را حفظ می‌نماید، بلکه به‌طور چشم‌گیری در حصول سود تجاری نیز نقش دارد. بسته‌بندی علاوه بر نقش حفاظتی، در افزایش فروش یک محصول نیز نقش دارد. وظیفه‌ی اصلی بسته‌بندی افزایش عمر انبارمانی از طریق ممانعت در برابر تهاجم میکروارگانیسم‌ها است [۲]. در واقع، هدف اصلی در بسته‌بندی معمول یا غیر فعال حفظ کیفیت محصول حین نگهداری تا مصرف، از طریق ایجاد یک مانع

* رایانامه نویسنده مسئول: j.akbarian67@gmail.com

فیزیکی در برابر نفوذ یک سری عوامل خارجی و گازها بـه داخـل ماده غذایی است. این در حالی است کـه عوامـل و واکـنش‌هـای ایجاد شده در غذا هم‌چون تنفس سلولی و تولیـد گـاز، از دسـت دادن یـا گـرفتن آب، تولیـد اتـیلن، تولیـد ترکیبـات حاصـل از اکسیداسیون و احتمالاً آلودگی میکروبـی مـاده غـذایی، در کنـار سایر عوامل معمول، نقشی تعیین‌کننده در کیفیت محصول دارند. در بسته‌بندی غیر فعال، پوشش مورد استفاده تأثیر مستقیم کافی برای کنترل عوامل مذکور ندارد و تنهـا در مـواد غـذایی خاصـی توانایی کنترل نسبی و غیر مستقیم برخی از ایـن عوامـل را دارد. در کل این بسته‌بندی از یک سازوکار تقریباً خنثـی در مقابلـه بـا عوامل داخلی مذکور برخوردار است. این در حـالی اسـت کـه در بسته‌بندی فعال، به‌منظور بهبـود خصوصـیات پوشـش و افـزایش مدت ماندگاری ماده غذایی، از یـک سـری ترکیبـات طبیعـی یـا سنتتیک در خود پوشش بسته‌بندی یا داخل بسته غذایی استفاده می‌شود. این نـوع بسـته‌بنـدی، جدیـدترین زمینـه در ارتبـاط بـا بسته‌بندی مـواد غـذایی بـه‌شـمار مـی‌رود و هـم‌چنـان در حـال پیشرفت است. در عمل هدف هر دو نوع بسته‌بندی فعـال و غیـر فعال یکی است ولی رهیافت مورد نیاز برای نیل به این هـدف در این دو نوع بسته‌بندی متفاوت است. اخیراً علاقه به توسعه نـوعی بسته‌بندی فعال به نام بسته‌بندی ضد میکروبی که موجب کمـک به بهبود ایمنی مواد غذایی و افـزایش مانـدگاری غـذا مـی‌شـود، افزایش یافته است [۳].

۲- بسته‌بندی فعال

بسته‌بندی فعال را می‌توان به‌عنوان شکلی از بسته‌بندی توصیف کرد که در آن علاوه‌بر حفظ کیفیـت محصـول، مـاده غـذایی و محیط برای افزایش ماندگاری، ایمنی یا ویژگی‌های حسی با هم در تعامل هستند [۳، ۴، ۵]. این امر به‌ویژه در مواد غذایی تازه و با ماندگاری طولانی مدت قابل توجه مـی‌باشـد [۶]. بـر اسـاس تحقیقات انور و ورسیکی [۷]، بسته‌بندی فعال بـرای تشـخیص تغییرات در محیط داخلی و پاسخ از طریق تغییـر ویژگـی‌هـای بسته برای افزایش ماندگاری مواد غذایی طراحی شده اسـت. در واقع طراحی بسته‌بندی فعـال شـامل گنجانـدن مـواد فعـال در بسته‌بندی می‌باشد که قرار است به غذای درون بسته آزاد شده یا از داخل غذای بسته بندی شده یا محیط اطراف آن جـذب - شوند (شکل ۱) [۵، ۸، ۹، ۱۰]. از این رو، بسـته‌بنـدی فعـال را می‌توان به دو گروه جذب‌کننده (جاذب‌ها) و آزادکننده تقسیم-بندی کرد. در حالی‌که جاذب‌ها مواد نـامطلوب ماننـد رطوبـت، دی‌اکسید کربن، اکسـیژن، اتـیلن، نـور UV و غیـره را از مـواد غذایی یا محیط حذف می‌کنند، رهاسازها موادی مانند ترکیبات ضد میکروبی، دی‌اکسید کربن، آنتی‌اکسیدان‌ها و طعم‌دهنده‌هـا را به غذای بسته‌بندی شده یا فضای فوقانی بسته اضافه می‌کنند [۱۱، ۱۲]. یک نمای کلی از تقسیم‌بندی بسـته‌بنـدی فعـال در شکل ۱ نشان داده شده است. این سامانه‌های بسته‌بندی فعـال را می‌توان با گنجاندن ترکیبات فعال در بسـته‌بنـدی، پوشـش، تثبیت (بی‌حرکتی) یا اصلاح سطح مواد بسته‌بندی ایجـاد کـرد [۱۳].



شکل (۱): تصویری از سامانه‌های جاذب و رهاساز فعال مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی [۱۰].

۳- بسته‌بندی ضد میکروبی

به‌طور کلی محصولات غذایی مستعد آلودگی میکروبی هستند که این مسئله یکی از علل اصلی بیماری‌های منتقله از غذا و یک نگرانی عمده برای سلامت عمومی و تحمیل بار اقتصادی بر صنایع غذایی می‌باشد [۱۴، ۱۵، ۱۶]. هدف بسته‌بندی ضد میکروبی مواد غذایی، کاهش، مهار یا به تعویق انداختن رشد میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا یا عامل فساد موجود در غذا یا مواد بسته‌بندی می‌باشد. بسته‌بندی ضد میکروبی یک سامانه مهمی است که به‌عنوان یک ساز و کار تحویل دهنده ماده ضد میکروبی برای محدود کردن رشد میکروارگانیسم‌ها در تمام مراحل حمل و نقل تا مصرف نهایی استفاده می‌شود [۱۶، ۱۷].

در بسته‌بندی‌های قدیمی، مواد ضد میکروبی را مستیقماً به فرمولاسیون اولیه مواد غذایی اضافه می‌کردند یا این‌که مواد ضدمیکروبی را از طریق عملیاتی مثل اسپری کردن، غوطه‌ور کردن و غیره در سطح مواد غذایی به‌کار می‌بردند[۲]. افزودن مستقیم مواد ضد میکروبی به مواد غذایی معایبی داشت که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱-کاهش غلظت مواد ضد میکروبی در سطح مواد غذایی به‌دلیل انتشار این مواد به بخش‌های درونی طی زمان و در نتیجه کاهش کارایی مواد ضد میکروبی.

۲-خنثی شدن ترکیبات ضد میکروبی در اثر واکنش با ترکیبات مواد غذایی و تغییر در طعم و مزه مواد غذایی.

با استفاده از بسته‌بندی ضد میکروبی می‌توان به مشکلات ناشی از افزودن مستقیم مواد ضد میکروبی به غذا غلبه کرد و هم‌چنین کیفیت و مدت نگهداری مواد غذایی را بهبود بخشید. میان انواع بسته‌بندی فعال از قبیل بسته‌بندی جاذب اکسیژن، دی‌اکسید کربن و اتیلن و بسته‌بندی کنترل رطوبت، بسته‌بندی ضد میکروبی از رایج ترین کاربردهای تکنولوژی‌های بسته‌بندی فعال می‌باشد. سامانه‌های بسته‌بندی مواد غذایی شامل ماده غذایی، اتمسفر فضای فوقانی و مواد بسته‌بندی هستند. هر یک از این سه بخش می‌توانند دارای جزء ضدمیکروبی جهت افزایش عملکرد ضد میکروبی باشد. فعالیت یک عامل ضد میکروبی یا از طریق تماس میکروارگانیسم‌ها با سطح داخلی مواد بسته‌بندی و یا به‌طور مستقیم در ماده غذایی از طریق انتشار تدریجی عامل ضد میکروبی از مواد بسته‌بندی به غذا انجام می‌شود [۱۷، ۱۸]. رهایش کنترل شده آن‌ها در طول دوره ماندگاری غذا، ساز و کاری از بسته‌بندی فعال است که بهبود ایمنی و ماندگاری مواد غذایی را تضمین می‌کند [۱۹].

۴- وضعیت صنعت بسته‌بندی ضد میکروبی در جهان

صنعت بسته‌بندی در جهان بیش از ۵۰۰ میلیارد دلار ارزش دارد و صنعت بسته‌بندی هند در سال ۲۰۱۸ با نرخ رشد ۱۵ درصدی تقریباً ۱۴ میلیارد دلار ارزش داشت. پیش‌بینی می‌شود در طی سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۲۴، بازار بسته‌بندی ضد میکروبی با نرخ رشد ۵/۲ درصد رشد کند. بنابراین، ارزش بازار بسته‌بندی ضد میکروبی در سال ۲۰۱۶، ۷/۶۵ میلیارد دلار بود و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۴ به ۱۱/۴۸ میلیارد دلار برسد. در سال ۲۰۱۷، آمریکای شمالی بیش از ۳۰ درصد و بیشترین سهم از بازار مواد بسته‌بندی ضد میکروبی را به خود اختصاص داد. تجارت بسته‌بندی ضد میکروبی در آمریکای شمالی به‌دلیل افزایش نگرانی‌های سلامت در خصوص اثرات مواد مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی بر سلامت و افزایش اهمیت بسته‌بندی ضد میکروبی در صنعت داروسازی، در حال گسترش است. پس از آمریکای شمالی، اروپا با داشتن سهمی بیش از ۲۸ درصد بازار جهانی بسته‌بندی ضد میکروبی، در رتبه دوم قرار دارد. در مقایسه با آمریکای شمالی و اروپا، آسیا بزرگترین بازار مواد بسته‌بندی را دارد، با این حال سهم کمی از مواد بسته‌بندی ضد میکروبی را به خود اختصاص داده است [۲۰].

۵- مواد ضد میکروبی

نگهدارنده‌ها به‌منظور جلوگیری و به تأخیر انداختن فساد میکروبی و شیمیایی در مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله نگهدارنده‌هایی که به‌منظور ممانعت از فساد شیمیایی استفاده می‌شوند، می‌توان به مواد زیر اشاره کرد:

۱-آنتی‌اکسیدان‌ها جهت جلوگیری از اتواکسیداسیون رنگدانه‌ها، مواد طعم‌زا، لیپیدها و ویتامین‌ها.

۲-ترکیبات ضد قهوه‌ای شدن، به‌منظور جلوگیری از قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی.

۳-ترکیبات ضد بیاتی جهت جلوگیری از تغییرات بافتی.

مواد ضد میکروبی آن دسته از افزودنی‌هایی هستند که جهت جلوگیری از فساد بیولوژیکی و میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نقش اصلی مواد ضد میکروبی غذایی، افزایش عمر انباری و حفظ کیفیت از طریق ممانعت از رشد میکروارگانیسم‌های مولد فساد است. اگرچه از آن‌ها به‌طور فزاینده‌ای به‌منظور ممانعت یا غیر فعال‌سازی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، به‌عنوان نقش ثانویه نیز استفاده شده است.

مواد ضد میکروبی ممکن است منشأ طبیعی یا غیر طبیعی داشته باشند. مواد ضد میکروبی طبیعی می‌توانند منشأ گیاهی، حیوانی یا میکروبی داشته باشد. برای استفاده یک ماده ضدمیکروبی در

ماده غذایی باید مجوز استفاده آن توسط سازمان‌های مربوطه صادر شده باشد. مواد ضد میکروبی مختلفی ممکن است به سامانه‌های بسته‌بندی ممزوج شوند که مهم‌ترین آن‌ها شامل مواد ضد میکروبی شیمیایی، آنتی‌اکسیدان‌ها، محصولات زیست‌فناوری، پلیمرهای ضد میکروبی، مواد ضد میکروبی طبیعی و گازها می‌باشند [۲۱]. در جدول (۱) نمونه‌هایی از کاربرد ترکیبات ضد میکروبی در بسته‌بندی مواد غذایی مختلف نشان داده شده است.

جدول (۱): چند نمونه از استفاده از عوامل ضد میکروبی مختلف در بسته‌بندی ضد میکروبی [۱۰].

عامل ضد میکروبی	روش استفاده	محصول غذایی	منبع
سوربات‌ها	ترکیب کردن عامل ضد میکروبی با مواد پلی اتیلن با دانسیته پایین	پنیر	[۲۲]
پتاسیم سوربات **کیتوزان** **لیزوزیم**	گنجاندن عوامل ضد میکروبی در فیلم نشاسته	سیب زمینی شیرین	[۲۳]
بوتیله هیدروکسی تولوئن	گنجاندن ماده ضد میکروبی در پلی اتیلن با دانسیته بالا (HDPE)	غلات	[۲۴]
سدیم بنزوات **پتاسیم سوربات**	پوشش‌های خوراکی فعال (EACs) حاوی عوامل ضد میکروبی	توت فرنگی	[۲۵]
نایسین **کیتوزان** **پتاسیم سوربات** **زئولیت جایگزین شده با نقره**	کیسه‌های چند لایه فعال (پلی اتیلن با دانسیته پایین (LDEP)/ پلی آمید)	مرغ	[۲۶]
بنزوئیک اسید **سدیم متابی سولفیت** **ترت- بوتیل هیدروکوینون** **اسانس دارچین** **اسانس پونه کوهی**	گنجاندن ماده ضد میکروبی در یک لایه چسبناک	پوره گوجه فرنگی	[۲۷]
بتا- سیکلودکسترین	بسته‌بندی با کف دولایه (با ماده ضد میکروبی فرار به دام افتاده)	سیب	[۲۸]
اسانس پونه کوهی	بارگذاری نانوامولسیون رزوراترول در پوشش خوراک پکتین	گوشت خوک	[۲۹]
زیره کپسوله شده	کپسوله کردن اسانس روغنی دانه زیره و بارگذاری آن روی کاغذهای فعال	همبرگر گوشت گاو	[۳۰]

۵-۱- مواد ضد میکروبی شیمیایی

۵-۱-۱- اسیدهای آلی و نمک‌های آن

اسیدهای آلی و نمک آن‌ها در ممانعت از رشد میکروبی بسیار مؤثر هستند. این مولکول‌ها رشد سلول‌های باکتریایی و قارچی را متوقف می‌کنند. اسیدهای آلی مانند بنزوئیک اسید، پارابن‌ها، سوربیک اسید، پروپیونیک اسید، استیک اسید، لاکتیک اسید، اسیدچرب‌های زنجیر متوسط، نمک‌ها (سوربات‌ها، بنزوات، پروپیونات) و ترکیب آن‌ها دارای فعالیت ضد میکروبی قوی هستند و به‌عنوان مواد نگهدارنده غذایی استفاده شده‌اند. عموماً پذیرفته شده که مولکول‌های تفکیک نشده اسیدهای آلی یا استرها، مسئول فعالیت ضد میکروبی آن‌ها هستند. بسیاری از اسیدهای ضعیف، در حالت تفکیک نشده می‌توانند از غشاء سلولی عبور کنند و در سیتوپلاسم تجمع یابند و آن را اسیدی کنند [۳۱].

۵-۱-۲- آنتی‌اکسیدان‌ها

آنتی‌اکسیدان‌ها مولکول‌هایی هستند که می‌توانند اکسیداسیون سایر ترکیبات را کاهش داده یا متوقف کنند. این ترکیبات، میزان اکسیژن را محدود کرده و به‌دنبال آن به‌عنوان ماده ضد قارچی عمل می‌کنند. آنتی‌اکسیدان‌های غذایی از قبیل TBHQ، BHT، BHA، توکفرول و آسکوربیک اسید را می‌توان به مواد بسته‌بندی اضافه کرد تا این‌که یک اتمسفر بی‌هوازی درون بسته‌ها ایجاد

شود و سرانجام مواد غذایی را در برابر فساد هوازی محافظت کنند [۳۲].

۵-۱-۳- الکل‌ها

بالشتک‌های حاوی اتانول، نمونه‌ای از سامانه‌های ضدمیکروبی گازی محسوب می‌شوند. بخار اتانول موجود در فضای فوقانی بسته می‌تواند رشد کپک‌ها و باکتری‌ها را متوقف کند. مشخص شده که اتانول عمر انباری نان و سایر محصولات نانوایی را وقتی‌که قبل از بسته‌بندی در سطح آن‌ها اسپری شوند، افزایش می‌دهند. در یک روش جدید تولید بخار اتانول، سامانه آزاد کننده اتانول درون بالشتک‌هایی قرار می‌گیرند و این بالشتک‌ها در فضای فوقانی بسته قرار می‌گیرند. در این روش، اتانول از طریق جذب سطحی در ساختار پودر غیر فعال که درون بالشتک‌هایی که به بخار آب نفوذپذیرند قرار می‌گیرد. باجذب رطوبت توسط پودر، بخار اتانول آزاد و از بالشتک‌ها به داخل فضای فوقانی بسته نفوذ می‌کند [۳۳].

۵-۱-۴- گازها

مواد ضد میکروبی گازی در مقایسه با سایر مواد ضد میکروبی شیمیایی از مزایایی برخوردارند. با توجه به این‌که آن‌ها می‌توانند تبخیر شوند، توانایی عبور از هرگونه فضایی را داشته و به آسانی به سطح مواد غذایی می‌رسند، در حالی‌که سایر مواد ضد میکروبی غیر گازی چنین توانایی ندارند. آلیل ایزوتیوسیانات، هینوکیتول و ازن در ساختار بسته‌ها ممزوج شده‌اند و فعالیت ضد میکروبی مؤثری نشان دادند [۲۱].

۵-۱-۵- دی‌اکسید کلر

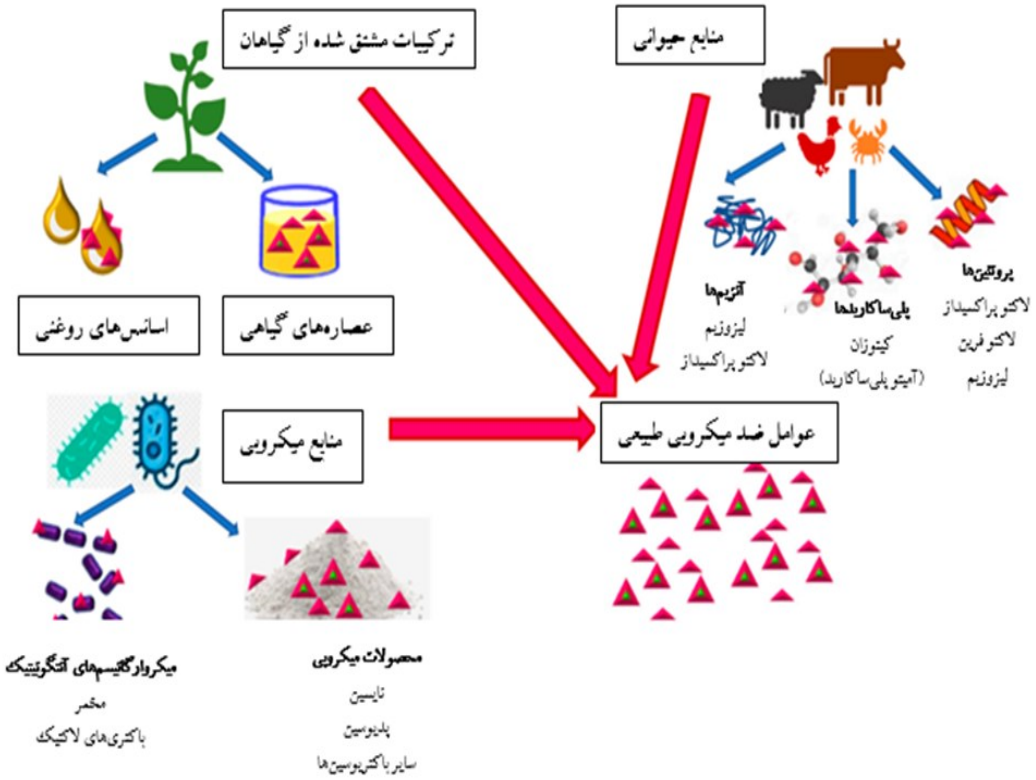
دی‌اکسید کلر در حالت گازی و آبی به‌عنوان یک ماده ضد میکروبی قوی با کاربردهای گوناگون در فرآوری و نگه‌داری مواد غذایی، مورد استفاده قرار گرفته است. دی‌اکسید کلر به‌عنوان یک ماده اکسید کننده عمل کرده و با ترکیبات سلولی متعددی مانند غشاء سلولی میکروب‌ها از طریق گرفتن الکترون از آن‌ها (اکسیداسیون) واکنش می‌دهد و هم‌چنین پیوندهای ملکولی آن‌ها را شکسته و در نهایت به‌دلیل فروپاشی سلول‌ها، میکروب‌ها را از بین می‌برد. به‌دلیل این‌که دی‌اکسید کلر ساختار پروتئین‌های موجود در ساختار میکروارگانیسم‌ها را تغییرمی‌دهد، فعالیت آنزیمی سلول‌ها از بین رفته و مرگ بسیار سریع باکتری‌ها رخ می‌دهد [۲۱].

۵-۱-۶- نانو ذرات ضد میکروبی

برای اولین بار در سال ۱۹۹۰، تحقیقات در مورد استفاده از نانوکامپوزیت‌ها برای بسته‌بندی مواد غذایی با استفاده از رس مونت موریلونیت به‌عنوان یک جزء نانویی در تعدادی از پلیمرها مانند پلی وینیل کلرید، پلی اتیلن، نایلون و نشاسته آغاز شد. مواد در مقیاس نانو در مقایسه با مقیاس میکرومولکولی، نسبت سطح به حجم بالایی دارند. این امر در نانو مواد، توانایی اتصال به مناطق بسیار بیشتری از مولکول‌های بیولوژیکی فراهم می‌کند که در نهایت باعث افزایش کارایی آن‌ها خواهد شد. فعالیت ضد میکروبی نانو مواد متعددی مورد بررسی و شناخته شده است، بنابراین از آن‌ها می‌توان به‌عنوان بازدارنده‌های رشد، مواد کشنده و حامل‌های آنتی‌بیوتیک‌ها استفاده کرد [۲۱].

۵-۲- مواد ضد میکروبی طبیعی

محافظت از مواد غذایی در مقابل میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و مولد فساد معمولاً با استفاده از نگه‌دارنده‌های شیمیایی صورت گرفته است. نگهدارنده شیمیایی به‌عنوان مواد ضد میکروبی عمل کرده و رشد میکروارگانیسم‌های نامطلوب را متوقف می‌کنند. البته افزایش تقاضا در مورد غذاهایی که تحت تأثیر حداقل فرآیند قرار گرفته‌اند، افزایش عمر انباری مواد غذایی، استفاده بیش از حد مواد شیمیایی که برخی از آن‌ها خاصیت سمی داشته و برخی پس آلودگی ایجاد می‌کنند، باعث شده که تولیدکنندگان مواد غذایی در پی جایگزینی برای این مواد شیمیایی باشند. در حال حاضر بحث‌های بسیار جدی راجع به جنبه‌های ایمنی نگهدارنده‌های شیمیایی وجود دارد، زیرا برخی از آن‌ها به‌عنوان مواد سرطان‌زا معرفی شدند. بنابر دلایل ذکر شده، مصرف کنندگان نسبت به افزودنی‌های شیمیایی مظنون هستند. بنابراین تحقیقات در مورد مواد ضد میکروبی طبیعی به‌دلیل آگاهی مصرف‌کننده از مزایای مواد غذایی طبیعی و نگرانی‌های مربوط به مقاومت میکروب در برابر نگه‌دارنده‌های شیمیایی قدیمی، بسیار افزایش یافته است. نظر به تقاضای مشتریان برای غذاهای عاری از نگهدارنده‌های شیمیایی، تولیدکنندگان غذا هم‌اکنون از مواد ضد میکروبی طبیعی جهت استریل کردن یا افزایش عمر انباری غذاها استفاده می‌کنند[۲۱]. شکل (۲) منابع عوامل ضد میکروبی طبیعی که به‌عنوان مواد افزودنی در سامانه‌های بسته‌بندی خوراکی به‌کار می‌روند را نشان می‌دهد.



شکل (۲): منابع عوامل ضد میکروبی طبیعی که به‌عنوان مواد افزودنی در سامانه‌های بسته‌بندی خوراکی استفاده می‌شوند [۱۰]

۵-۲-۱- باکتریوسین‌ها

باکتریوسین‌ها، پپتیدهای فعالی از نظر زیستی هستند که توسط میکروارگانسیم‌ها تولید می‌شوند و رشد میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا را متوقف می‌کنند. این محصولات تخمیری عبارتند از: نایسین که توسط لاکتوکوکوس لاکتیس تولید می‌شود، لاکتیسین، پدیوسین، دیولوکوسین و پروپیونیسین‌ها. سایر محصولات تخمیری غیر پپتیدی مانند روترین نیز فعالیت ضد میکروبی نشان داده‌اند [۳۴]. در میان مواد ضد میکروبی طبیعی، نایسین به‌طور گسترده‌ای در فیلم‌های بسته‌بندی استفاده شده است. بسیاری از مطالعات اخیر گزارش کرده‌اند که مواد بسته‌بندی دارای نایسین از رشد باکتری‌های گرم مثبت از قبیل بروکوتریکس ترموسفاکتا، لاکتوباسیلوس هلوِتیکوس، لیستریا مونوسیتوژنس، میکروکوکوس فلاووس و پدیوکوکوس پِنتوساسئوس ممانعت کرده و عمرانباری مواد غذایی فسادپذیر را از طریق کاهش رشد باکتری‌های مولد فساد افزایش داده است. نایسین قادر است فرآیند حرارتی ملایم را تحمل نماید و در محیط‌های اسیدی؛ بدون هیچ‌گونه کاهش در فعالیت ضد میکروبی، پایدار باقی بماند که به مزایای بالای استفاده از این‌گونه عوامل در مواد بسته‌بندی غذایی برمی‌گردد [۳۵].

سایر باکتریوسین‌ها، از قبیل پدیوسین و لاکتیسین نیز در فیلم-های بسته‌بندی، جهت تهیه سامانه‌های بسته‌بندی ضد میکروبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نایسین و سایر باکتریوسین‌ها قادر به جلوگیری از باکتری‌های گرم مثبت هستند؛ اما در برابر کپک‌ها، مخمرها و باکتری‌های گرم منفی، به غیر از چندین سوشه، ناکارآمد هستند. استفاده از باکتریوسین‌ها در نگه‌داری مواد غذایی به‌دلیل طیف فعالیت نسبتاً باریک آن‌ها و اثرات ضد میکروبی متوسط با محدودیت‌های زیادی همراه است [۳۲].

۵-۲-۲- آنزیم‌ها

لیزوزیم پیوندهای گلیکوزیدی را در لایه پپتیدوگلیکانی دیواره سلول‌های باکتریایی هیدرولیز می‌کند. این آنزیم مؤثرترین ماده ضد میکروبی در برابر باکتری‌های گرم مثبت محسوب شده و در برابر باکتری‌های ترموفیل تولید کننده اسپور بسیار مفید است. از آن می‌توان در پنیرهای رسیده استفاده کرد. گروه دیگری از آنزیم‌های ضد میکروبی عبارتاند از: گلوکانازهایی که ساختار گلوکانی دیواره سلول‌های قارچی را هیدرولیز می‌کنند و کیتینازهایی که باعث شکستن کیتین دیواره‌های سلولی می شوند. سایر آنزیم‌های اکسیدو ردوکتاز مانند لاکتو پراکسیداز، گلوکز اکسیداز و کاتالاز که واکنش‌های تولیدکننده ترکیبات

سیتو توکسینیرا کاتالاز می‌کنند، ممکن است مواد غذایی را در برابر فساد اکسیداتیو محافظت کنند. پپتیدهایی با خاصیت باندکنندگی آهن مانند اوو ترانسفرین موجود در سفیده تخم مرغ و سرم ترانسفرین موجود در خون نیز فعالیت ضد میکروبی دارند. تأثیر ضد میکروبی آن‌ها ظاهراً در نتیجه باند کردن آهن مورد نیاز برای رشد میکروارگانیسم‌ها می‌باشد [۳۱].

۵-۲-۳- مواد ضد میکروبی گیاهی

گیاهان خود را در برابر میکروارگانیسم‌ها و شکارچی‌های مختلف از طریق تولید رنج وسیعی از ترکیبات محافظت می‌کنند. این ترکیبات تحت عنوان متابولیت‌های ثانویه شناخته می‌شوند و برای فرایندهای متابولیکی اصلی ضروری نیستند. ترکیبات ضد میکروبی حاصل از گیاهان را می‌توان به دو گروه عصاره‌های گیاهی و اسانس‌ها تقسیم کرد [۳۶].

۵-۲-۳-۱- عصاره‌های گیاهی

استفاده از عصاره‌های طبیعی گیاهان برای توسعه مواد غذایی جدید، دارو و هم‌چنین سامانه‌های بسته‌بندی ضد میکروبی بسیار مطلوب می‌باشد. برخی از عصاره‌های گیاهی مانند عصاره دانه گریپ فروت، دارچین، ترب کوهی و میخک به سامانه‌های بسته‌بندی اضافه شده‌اند و فعالیت ضد میکروبی مؤثری در برابر باکتری‌های بیماری‌زا و مولد فساد نشان داده‌اند. استفاده زیاد آن ها در مقایسه با مواد ضد میکروبی شیمیایی به‌دلیل ترجیح مصرف‌کننده و قوانین آسان مربوط به استفاده آن‌ها می‌باشد. بیشترین مطالعات صورت گرفته در بین مواد ضد میکروبی گیاهی مربوط به آلیل ایزوتیوسیانات حاصل از ترب کوهی و رزماری می‌باشد [۳۶].

۵-۲-۳-۲- اسانس‌های گیاهی

اسانس‌های گیاهی نیز به‌عنوان مواد ضد میکروبی طبیعی، جایگزینی برای مواد نگه‌دارنده شیمیایی محسوب می‌شوند. کاربرد عملی آن‌ها به‌دلیل مشکلات طعمی و میزان کارایی متوسط (به‌دلیل برهم‌کنش با اجزاء و ساختار غذایی) محدود شده است. اسانس‌ها ترکیبی از استرها، آلدهیدها ،کتون‌ها، ترپن ها و ترکیبات فنولی هستند. مطالعات نشان داده که ترکیبات فرار اسانس پونه کوهی می‌توانند روی رشد و فعالیت متابولیکی میکروب‌های مرتبط با گوشت‌های ذخیره شده در اتمسفر اصلاح شده تأثیر بگذارند. معروف‌ترین اسانس‌های ضد میکروبی عبارت‌اند از: میخک، دارچین، فلفل قرمز، سیر، آویشن، پونه کوهی و رزماری. البته فعالیت ممانعت‌کنندگی سایر اسانس‌ها نیز گزارش شده است [۳۳].

۵-۲-۴- پروبیوتیک‌ها

میکروارگانیسم‌های مختلف مانند لاکتیک اسید باکتری‌ها، باکتریوسین‌ها و سایر مواد شیمیایی غیر پپتیدی بازدارنده رشد از قبیل روترین تولید می‌کنند. این ضد میکروب‌های طبیعی قادر به بازداری رشد سایر باکتری‌ها هستند. در نتیجه با استفاده از پروبیوتیک‌ها می‌توان به‌طور مؤثری میکروارگانیسم‌های نامطلوب رقیب را کنترل نمود. بسیاری از محصولات غذایی تخمیری سنتی دارای پروبیوتیک‌های ضد میکروبی هستند. پژوهش‌ها و پیشرفت‌های بسیاری در خصوص عملکرد پروبیوتیک‌های ضد میکروبی جهت نگهداری مواد غذایی تخمیری صورت گرفته است. در حال حاضر تنها پژوهش‌های محدودی در مورد استفاده از پروبیوتیک‌ها جهت طراحی بسته‌بندی ضد میکروبی در حال انجام است. با توسعه فناوری جدید جهت ارائه پروبیوتیک‌های زنده، استفاده از پروبیوتیک‌ها به‌عنوان منبع ضد میکروبی جهت بسته‌بندی ضد میکروبی غذا در آینده به‌دلیل ایمنی و کارایی بالا متداول‌تر خواهد شد [۳۷].

۶- انواع سامانه‌های بسته‌بندی ضد میکروبی

بسته‌بندی سامانه‌ی است شامل محصول، بسته و اتمسفر درون بسته. مواد ضد میکروبی را می‌توان در بخش‌های غیر غذایی سامانه بسته‌بندی وارد نمود که این بخش‌ها شامل بسته یا اتمسفر درون بسته می‌باشند. مواد ضد میکروبی را می‌توان به‌طور مستقیم در مواد بسته‌بندی در قالب فیلم، پوشش روی فیلم، ورقه، سینی یا در فضای درون بسته به شکل بالشتک‌ها وارد نمود. پوشش‌های خوراکی هم‌چنین می‌توانند حاوی مواد ضد میکروبی خوراکی باشند و از تنزل کیفیت در غذاهای پوشش داده شده جلوگیری کنند [۲].

۶-۱- قرار دادن بالشتک‌های حاوی مواد ضد میکروبی فرار درون بسته‌ها

مؤفق‌ترین کاربرد تجاری بسته‌بندی ضد میکروبی بالشتک‌هایی هستند که در فضای درونی بسته‌ها قرار داده شدند. این قبیل بسته‌بندی‌ها در سه حالت قرار دارند: جاذب‌های اکسیژن و رطوبت و سامانه تولیدکننده بخار اتانول. اگرچه جاذب‌های

اکسیژن ممکن است به‌عنوان مواد ضد میکروبی در نظر گرفته نشوند، اما از طریق کاهش اکسیژن، رشد میکروب‌های هوازی، مخصوصاً کپک‌ها را متوقف می‌کنند. جاذب‌های رطوبت می‌توانند a_w را کاهش دهند و به‌طور غیر مستقیم روی رشد میکروبی تأثیر بگذارند. سامانه‌های تولید کننده بخار اتانول، از اتانول جذب شده یا انکپسوله شده در مواد حامل تشکیل شده‌اند که درون پلیمر بسته قرار می‌گیرند. اتانول از میان موانع انتخابی عبور کرده و به فضای فوقانی بسته آزاد می‌شود. به‌دلیل این‌که میزان اتانول تولید شده نسبتاً کم بوده و فقط در محصولات با فعالیت آبی پایین (a_w > ۰/۹۲) مؤثر است، کاربرد آن‌ها عمدتاً برای به تأخیر انداختن رشد کپک‌ها در محصولات نانوایی و ماهی‌های خشک شده می‌باشد [۱۸].

۶-۲- افزودن مستقیم مواد ضد میکروبی به پلیمرهای بسته‌بندی

هدف اصلی از افزودن مستقیم مواد ضد میکروبی به داخل مواد بسته‌بندی، جلوگیری از رشد سطحی در مواد غذایی می‌باشد، زیرا نسبت بسیار زیادی از فسادها و آلودگی‌ها در این مکان رخ می‌دهد. به‌عنوان مثال گوشت‌های دست نخورده حاصل از حیوانات سالم، اساساً سالم هستند و فساد عمدتاً در سطح آن‌ها ایجاد می‌شود. این روش می‌تواند افزودن مقدار بسیار زیاد مواد ضد میکروبی که معمولاً به کل توده گوشت ممزوج می‌شوند را کاهش دهد. رهایش تدریجی مواد ضد میکروبی از فیلم‌های بسته‌بندی به سطح مواد غذایی می‌تواند از جمله مزایای دیگر این روش نسبت به غوطه‌ور کردن و اسپری کردن محسوب شود. مواد ضد میکروبی GRAS [1]، غیر GRAS و طبیعی متنوعی به درون کاغذ، پلیمرهای ترموپلاستیک و ترموست افزوده شدند و در برابر انواع میکروارگانیسم‌ها از قبیل لیستریا مونوسیتوژنس، اشرشیا کلای و ارگانیسم‌های مولد فساد مانند کپک‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. در بین مواد ضد میکروبی، زئولیت‌های جایگزین شده با نقره، پرکاربردترین مواد افزوده شده به پلیمرها جهت استفاده در مواد غذایی، مخصوصاً در ژاپن هستند. یون‌های سدیم که در ساختار زئولیت‌ها وجود دارند، با یون‌های نقره که در برابر طیف وسیعی از باکتری‌ها و کپک‌ها خاصیت ضد میکروبی دارند، جایگزین شده‌اند. این زئولیت‌های جایگزین شده به درون پلیمرهایی مثل پلی اتیلن، پلی‌پروپیلن، نایلون و بوتا دی ان استایرن در سطح ۳-۱ درصد اضافه شدند. یون‌های نقره توسط سلول باکتری جذب شده و فعالیت آنزیم‌های سلول دچار اختلال می‌شود. نمونه‌های تجاری از زئولیت‌های جایگزین شده با نقره عبارتند از: AgIon™، Apacider®، Zeomic® و Novaron® [۳۴].

۶-۳- مواد ضد میکروبی استفاده شده در فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی

فیلم خوراکی می‌تواند به‌صورت پوشش پیوسته روی غذا و یا به صورت لایه قابل امتزاج بین بسته‌بندی و غذا قرار گیرد. معمولاً فیلم‌های خوراکی از سه ترکیب اصلی پروتئین، پلی‌ساکارید و لیپید تشکیل می‌شوند. پروتئین‌های مورد استفاده در تولید فیلم خوراکی شامل گلوتن گندم، کلاژن، زئین ذرت، سویا، کازئین و پروتئین آب‌پنیر هستند. آلژینات، دکسترین و پکتین نیز در تولید فیلم‌های بر پایه پلی‌ساکارید به‌کار می‌روند. لیپیدهای مناسب جهت استفاده در فیلم‌ها نیز شامل واکس‌ها، آسیل گلیسرول و اسیدهای چرب هستند [۳۸]. با توجه به مزیت‌های فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی نسبت به مواد مورد استفاده دیگر در بسته بندی در سالیان اخیر توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از:

- عدم رهایش آن‌ها در محیط زیست در صورت مصرف شدن آن ها با مواد غذایی.
- در صورت رها شدن در طبیعت قابلیت تخریب‌پذیری و در نتیجه سازگاری بالایی با محیط زیست دارند.
- امکان به‌دست آوردن این مواد از مواد قابل تجدیدپذیر طبیعی. - امکان بهبود خصوصیات حسی ماده غذایی با افزودن طعم‌دهنده‌ها، رنگ دهنده‌ها و یا شیرین‌کننده‌ها به‌همراه آن‌ها.
-قابلیت ارزش غذایی در صورت استفاده از پوشش‌های پروتئینی خوراکی.
- قابلیت بسته‌بندی مواد غذایی با اندازه کوچک مانند دانه‌ها، میوه‌های کوچک مثب توت‌ها و آجیل.

این سامانه قابلیت انتقال عوامل ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی به ماده غذایی را دارد و می‌تواند میزان آزاد شدن این مواد را بر سطح ماده غذایی کنترل نماید [۳۹].

به‌منظور ممانعت از رشد میکروارگانیسم‌های مولد فساد و کاهش خطر پاتوژن‌ها می‌توان بسیاری از مواد ضد میکروبی را در فرمولاسیون فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی استفاده کرد. در بین مواد ضد میکروبی استفاده شده در فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی؛ اسیدهای آلی، کیتوزان، برخی پلی پپتیدها مثل نایسین، سامانه لاکتو پراکسیداز، عصاره‌های گیاهی و اسانس‌های روغنی کاربرد بیشتری نسبت به سایر مواد ضد میکروبی داشتند[۴۰].

[1] Generally Recognized As Aafe (GRAS)

جدول (۲): چند مثال از استفاده از ترکیبات ضد میکروبی مختلف در فیلم و پوشش‌های خوراکی [۳۸]

فیلم	عوامل ضد میکروبی	محیط/ ماده غذایی	مرجع
کیتوزان	استیک، پروپیونیک، لوریک اسید	گوشت فرآیند شده	[۴۱]
آلژینات	لاکتیک اسید	گوشت ماهیچه گاو بدون چربی	[۴۲]
ایزوله پروتئین سویا	آمینو بنزوئیک اسید با لاکتیک اسید، پتاسیم سوربات با لاکتیک اسید، استیک اسید، لاکتیک اسید	برش‌های سوسیس و هات داگ	[۳۸، ۴۳، ۴۴]
گلوتن گندم	سوربیک اسید	ذرت شیرین پخته شده	[۴۵]
زئین ذرت	نایسین	شیر	[۴۶]
نشاسته	پتاسیم سوربات	سینه مرغ	[۴۷]

۶-۴- پوشش دادن سطح پلیمرها با مواد ضد میکروبی یا جذب سطحی مواد ضد میکروبی در ساختار آن

مواد ضد میکروبی که نمی‌توانند دمای مورد استفاده در فرآیندهای تولید پلیمر را تحمل نمایند، اغلب بعد از تولید پلیمر، به‌صورت یک پوشش در سطح آن قرار گرفته یا این‌که به فیلم های تهیه شده به‌روش کاستینگ اضافه می‌شوند. به‌عنوان مثال، فیلم‌های خوراکی تهیه شده به‌روش کاستینگ به‌عنوان حامل‌های مواد ضد میکروبی و به‌عنوان پوشش در سطح مواد بسته‌بندی یا مواد غذایی مورد استفاده قرار گرفتند. پوشش‌های نایسین/ متیل سلولز به‌کار رفته در سطح فیلم‌های پلی‌اتیلن و پوشش‌های نایسین/ زئین به‌کار رفته در سطح گوشت ماکیان نمونه‌هایی از این سامانه‌ها به‌شمار می‌روند. به‌منظور دستیابی به این نوع بسته-بندی، باید مواد ضد میکروبی و پلیمر واجد گروه‌های عملکردی باشند. پپتیدها، آنزیم‌ها، پلی‌آمین‌ها و اسیدهای آلی نمونه‌هایی از مواد ضد میکروبی واجد گروه‌های عملکردی هستند. نمونه‌هایی از پلیمرهای واجد گروه‌های عملکردی که برای بسته‌بندی ضد میکروبی مورد استفاده قرار گرفتند عبارت‌اند از: اتیلن ونیل استات (EVA)، اتیلن متیل استات (EMA)، اتیلن آکریلیک اسید (EAA)، نایلون، پلی‌ونیل کلرید (PVC)، پلی‌اتیلن (PE) و پلی استایرن (PS). علاوه بر پلیمر و مواد ضد میکروبی عملگرا، ممکن است به مولکول‌های فضاساز که مواد فعال را به سطح پلیمر متصل می‌کنند، برای تثبیت مواد ضد میکروبی مورد نیاز باشد. این فضاسازها آزادی کافی در جنبش مواد ضد میکروبی فراهم کرده و باعث می‌شوند مواد ضد میکروبی با کارایی بالاتری با میکروارگانیسم‌های موجود در سطح مواد غذایی متصل شوند. فضاسازهایی که به‌دلیل سمیت پایین می‌توانند در بسته‌بندی ضد میکروبی مواد غذایی به‌کار برده شوند، عبارتند از: دکستران‌ها، پلی‌اتیلن گلیکول اتیلن دی آمین و پلی اتیلن ایمین [۱۸].

۶-۵- استفاده از پلیمرهایی که ذاتاً خاصیت ضد میکروبی دارند

برخی از پلیمرها مانند کیتوزان ذاتاً خاصیت ضد میکروبی دارند و در فیلم‌ها و پوشش‌ها استفاده می‌شوند. اگرچه ساز و کار دقیق فعالیت ضد میکروبی کیتوزان هنوز شناخته نشده است، اما پیشنهاد شده که ماهیت پلی‌کاتیونی این پلی‌مر که از محلول‌های آبی (pH>۵/۶) تشکیل می‌شود، پارامتر اصلی و مهم در این عمل است. بنابراین بارهای مثبت گروه‌های آمین موجود در واحدهای گلوکز آمین با بارهای منفی ترکیبات دیواره سلولی میکروب‌ها واکنش داده و این واکنش سبب ایجاد یک لایه اطراف دیواره سلولی می‌شود و خصوصیات ممانعت‌کنندگی دیواره سلول‌ها را تغییر می‌دهد که در نتیجه آن ورود مواد مغذی به درون سلول با مشکل مواجه شده و نشت مواد بین سلولی صورت می‌گیرد [۲۱].

۷- طراحی سامانه‌های ضد میکروبی

۷-۱- ساز و کارهای ضدمیکروبی

۷-۱-۱- میکروب‌کشی و بازدارندگی میکروبی

انتظار می‌رود که سامانه‌های بسته‌بندی ضد میکروبی، باکتری های بیماری‌زا و عامل فساد هدف را از بین ببرند، زیرا این سامانه‌ها قادر به حذف هر میکروارگانیسمی از سامانه بسته بندی/غذایی خواهند بود. اگرچه حذف تمامی میکروارگانیسم‌ها عملاً بسیار سخت است، اما هنگامی‌که غلظت ماده ضد میکروبی برای مدت اندکی بالای حداقل غلظت بازدارندگی (MIC) می‌رود، سامانه ضد میکروبی میکروب‌کش قادر به کشتن میکروارگانیسم-های هدف خواهد بود. اگر غلظت اولیه سامانه‌های ضد میکروبی میکروب‌کش، کمتر از MIC میکروارگانیسم‌های هدف باشد و غلظت هرگز بالای MIC نرود، مواد ضد میکروبی ممکن است به جای اثر میکروب‌کشی، نوعی اثر بازدارندگی میکروبی از خود

نشان دهد. بنابراین، حفظ غلظت ضد میکروبی بالای MIC به‌مدت معین، جهت حذف میکروارگانیسم‌های هدف بسیار مهم است [۲].

۸- روش‌های انتقال مواد ضدمیکروبی

در اغلب مواد غذایی جامد یا نیمه جامد بسته‌بندی شده، میکروارگانیسم‌ها ابتدا در سطح غذا رشد می‌کنند. بنابراین، فعالیت ضد میکروبی باید روی این سطوح اعمال شود. فعالیت ضد میکروبی با توجه به روش قرار دادن مواد ضد میکروبی، ممکن است در مواد بسته‌بندی، در اتمسفر داخل بسته یا در فضای فوقانی به وقوع بپیوندد. جهت تحت فشار قرار دادن و ممانعت از رشد میکروبی، مواد ضد میکروبی (فعالیت ضد میکروبی) باید به سطح مواد غذایی انتقال داده شود. بنابراین، روش‌های قرار دادن مواد ضد میکروبی در سامانه و تکنیک‌های انتقال آن‌ها در طراحی سامانه‌های بسته‌بندی ضد میکروبی مؤثر، بسیار مهم هستند [۳۷].

۸-۱- مهاجرت غیرفرار

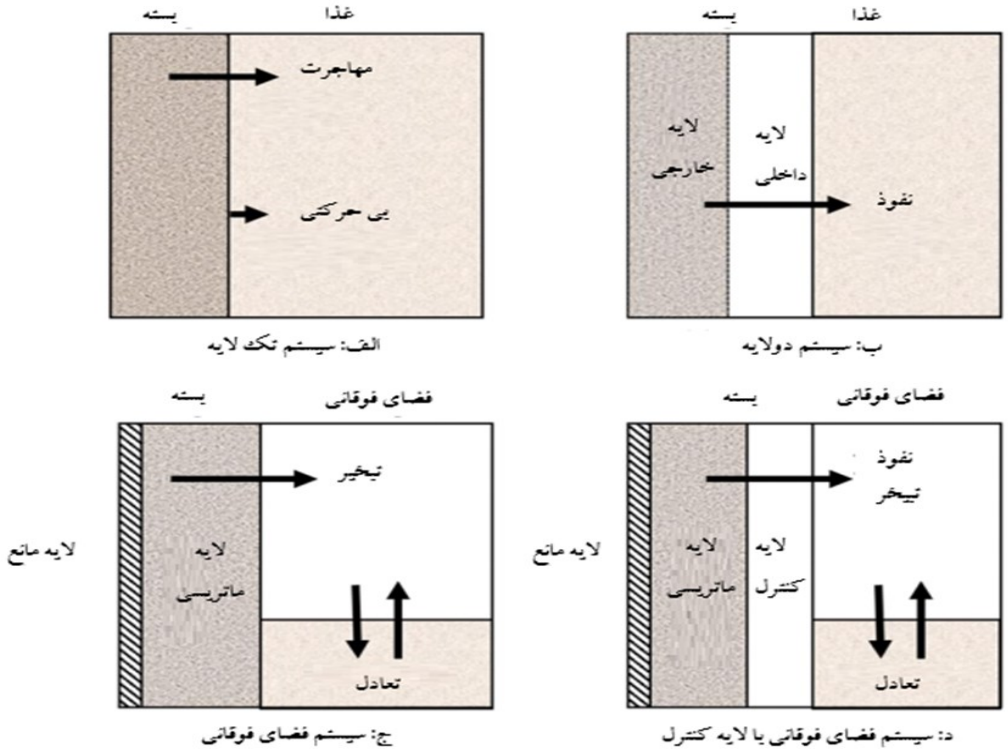
انتقال جرم مواد ضد میکروبی غیر فرار از طریق مهاجرت انتشاری صورت می‌گیرد. مواد ضد میکروبی غیر فرار را می‌توان در مواد بسته‌بندی یا بین بسته و سطح مواد غذایی قرار داد. اگر مواد ضد میکروبی روی سطح مواد غذایی اسپری شوند، غلظت اولیه در سطح بسیار بالا بوده و به مرور زمان به‌دلیل حل شدن و انتشار آن‌ها به سمت مرکز مواد غذایی، کاهش می‌یابد. بنابراین، جهت حفظ غلظت مواد بالای نقطه حداقل غلظت ممانعت‌کنندگی طی مدت زمان نگهداری، میزان حلالیت (ضریب تفکیک) و ضریب انتشار از جمله خصوصیات بسیار مهم می‌باشند. اگر ماده ضد میکروبی با مواد بسته‌بندی ممزوج شده، باید این مواد از مواد بسته‌بندی رها شده و قبل از انتشار درون مرکز مواد غذایی در سطح مواد غذایی حل شوند. بنابراین قابلیت انتشار (ضریب انتشار) مواد ضد میکروبی از مواد بسته‌بندی، میزان حلالیت مواد ضد میکروبی در سطح مواد غذایی و میزان انتشار آن‌ها درون ماده غذایی از جمله پارامترهای مهم در فراهم کردن پروفایل انتقال جرم پیوسته می‌باشند. به‌منظور فراهم کردن فعالیت ضد میکروبی کافی در یک سامانه (غذا/ بسته/ مواد ضد میکروبی)، باید سرعت انتقال جرم با سرعت رشد میکروب‌ها متناسب باشد. به‌دلیل این‌که مهاجرت مواد از نوع غیر فرار می‌باشد، این قبیل سامانه‌ها به یک تماس کامل بین مواد بسته‌بندی و سطح مواد غذایی نیاز دارند. مواد غذایی باید یک شکل پیوسته و بدون منفذ، حفره، حباب هوا یا ذرات ناهمگون باشند، زیرا این موارد انتشار را با مشکل مواجه می‌کنند. مزایای سامانه مهاجرتی غیر فرار، سهولت در طراحی سامانه است که آن را می‌توان بدون سرمایه‌گذاری بالا و با استفاده از سامانه‌های بسته‌بندی موجود انجام داد و سهولت در کنترل و حفظ کارایی آن اشاره کرد. غذاهای جامد تک جزئی، نیمه جامد (جامد نرم) و محصولات مایع نمونه‌های خوبی از محصولاتی هستند که می‌توانند در آن‌ها از این سامانه بسته‌بندی ضد میکروبی استفاده کرد [۳۴].

۸-۲- مهاجرت فرار

بسیاری از محققان بیان کردند که وجود تماس کامل بین ماده ضد میکروبی با سطح غذا، جهت تسهیل مهاجرت عامل فعال به‌منظور دستیابی به حداکثر کارایی ضروری است. اگرچه، در صورت استفاده از مواد ضد میکروبی فرار، این امر ضرورتی ندارد. به‌منظور حفظ غلظت سطحی در مقادیر بالای MIC مشخص، کنترل غلظت گاز فضای فوقانی بسیار مهم است؛ زیرا غلظت مواد فرار در فضای فوقانی با غلظت سطح غذا و مواد درون بسته به تعادل می‌رسد. در ابتدا، مواد فرار در ماده بسته‌بندی قرار داده می‌شود که ممکن است فیلم، ظرف، بالشتک یا سینی باشد. بعد از بسته‌بندی غذا، ماده فرار به درون فضای فوقانی تبخیر می‌شود و سپس به سطح غذا می‌رسد و توسط غذا جذب می‌شود. انتقال جرم ماده فرار در سامانه بسته‌بندی به‌نحو فعالی به تعادل می‌رسد. نرخ رهایش ماده فرار از سامانه بسته‌بندی شدیداً به فراریت که خود به برهمکنش شیمیایی میان ماده فرار و مواد بسته‌بندی مرتبط است بستگی دارد. روش‌هایی جهت کنترل فراریت مواد در سامانه بسته‌بندی وجود دارد که شامل استفاده از روغن، سیکلو دکسترین یا میکرو و نانو انکپسولاسیون می‌باشد. این تکنیک‌ها قادر به کنترل فراریت مواد و نهایتاً حفظ غلظت فضای فوقانی هستند. نرخ جذب مواد فرار فضای فوقانی به سطح غذا، به ترکیب غذا مرتبط است، زیرا ترکیبات متحمل واکنش‌های شیمیایی با موادگازی می‌شوند. از آن‌جا که اغلب مواد فرار به‌طور کلی چربی‌دوست هستند، محتوای چربی غذا پارامتر مهمی در غلظت فضای فوقانی به‌شمار می‌رود. استفاده از مواد ضد میکروبی فرار مزایای متعددی دارد. این سامانه می‌تواند به‌طور مؤثر برای غذاهای بسیار متخلخل، غذاهای پودری، خردشده، بدون شکل معین و ذره‌ای از قبیل گوشت گاو چرخ شده، پنیر ریز، میوه‌های کوچک، سبزیجات مخلوط و غیره استفاده شود [۳۷].

۸-۳- عدم مهاجرت و جذب

در سامانه‌های غیر مهاجرتی از پلیمرهای ضد میکروبی غیر مهاجرتی استفاده می‌شود که در این صورت مواد ضد میکروبی به‌دلیل باندهای کوالانسی که با اسکلت پلیمر برقرار کردند از پلیمر رها نمی‌شوند. در این سامانه به‌خاطر این که مواد ضد میکروبی متحرک نیستند، فعالیت آن‌ها فقط به سطح تماس آن‌ها محدود می‌شود. این محدودیت در مواد غذایی جامد و نیمه جامد بسیار مهم می‌باشد اما در مواد غذایی مایع این محدودیت ممکن است به حداقل برسد. به‌عنوان یک سامانه بسته‌بندی، این سامانه غیر مهاجرتی مزیت‌هایی در بازاریابی و قوانین دارد. به‌دلیل این‌که مواد فعال مهاجرت نمی‌کنند، این سامانه به‌مقدار بسیار کمی از مواد ضدمیکروبی نیاز دارد. این امر هزینه کلی سامانه‌های بسته‌بندی که از مواد ضدمیکروبی بسیار گران استفاده می‌کنند را کاهش می‌دهد. این سامانه می‌تواند حاوی مواد ضد میکروبی باشند که به‌عنوان اجزای غذایی یا مواد افزودنی محسوب نمی‌شوند. از لحاظ جنبه‌های بازاریابی، این سامانه‌ها جذاب هستند، زیرا در آن‌ها از هیچ نوع ماده شیمیایی استفاده نشده است. البته در برابر این مزایا، در این سامانه در انتخاب مواد ضد میکروبی با محدودیت‌های زیادی روبرو هستیم و هم‌چنین می‌توانیم در مواد غذایی معینی از آن‌ها استفاده کنیم[۴۸]. شکل (۳) یک سامانه ضد میکروبی و رفتار نسبی مواد فعال را نشان می‌دهد.



شکل (۳): سامانه ضد میکروبی فعال [۳، ۴۹].

در شکل (۳) (الف و ب) عوامل ضد میکروبی از طریق انتشار در سطح مشترک بین مواد بستبندی و غذا آزاد می‌شوند. گنجاندن عامل ضد میکروبی در مواد بسته‌بندی از طریق بی‌حرکت کردن یا تثبیت از طریق ایجاد پیوندهای شیمیایی صورت می‌گیرد (شکل ۳ الف). در شکل (۳ الف)، عامل ضد میکروبی در مواد بسته‌بندی گنجانده می‌شود. برای تنظیم سرعت انتشار، به‌ویژه در سامانه‌های دو لایه (شکل ۳ ب)، عامل ضد میکروبی (لایه بیرونی) روی مواد بسته‌بندی (لایه داخلی) پوشانده می‌شود یا لایه ماتریس ضد میکروبی (لایه خارجی) با لایه کنترل (لایه داخلی) پوشانده می‌شود. شکل (۳ ج)، یک سامانه بسته‌بندی با فضای فوقانی را نشان می‌دهد. در این‌جا، ماده ضد میکروبی فرار که ابتدا در لایه ماتریس یک‌پارچه شده بود، به داخل فضای فوقانی آزاد می‌شود. برای تقسیم ماده ضد میکروبی بین فضای فوقانی و محصول غذایی از ایزوترم/جذب متعادل شده، استفاده می‌شود. یک سامانه با فضای فوقانی با یک لایه کنترل در شکل (۳ د) نشان داده شده است. لایه کنترل دقیقاً نفوذپذیری ماده ضد میکروبی فرار را تنظیم می‌کند و غلظت فضای فوقانی را حفظ می‌کند. شکل (۳ ج و د) نشان می‌دهند که فراریت عوامل ضد میکروبی به آن‌ها این اجازه را می‌دهد تا به ذرات فاز گازی فضای فوقانی در تماس با ماده غذایی برسند [۱۰].

۹- پارامترهای فنی مؤثر در طراحی سامانه‌های ضد میکروبی

در طراحی سامانه‌های ضد میکروبی باید علاوه بر خصوصیات مواد ضد میکروبی، روش‌های افزودن مواد ضد میکروبی، نفوذ و تبخیر آن‌ها، بسیاری از پارامترهای دیگر از جمله مقاومت میکروارگانیسم‌ها، رهایش کنترل شده، ساز و کارهای رهایش، ماهیت شیمیایی مواد ضد میکروبی و مواد غذایی، شرایط نگه‌داری و توزیع، شرایط فرآیند فیلم، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد بسته‌بندی ضد میکروبی، خواص حسی و سمیت مواد ضد میکروبی و قوانین متناظر با آن‌ها را مد نظر داشته باشیم [۵۰].

۹-۱- سازگاری بین شرایط فرآیند و خصوصیات مواد

روش‌های تولید فیلم مثل اکستروژن و تبخیر حلال در حفظ کارایی سامانه ضد میکروبی بسیار مهم می‌باشند. در مورد اکستروژن، دما و انرژی مکانیکی پارامترهای مهم در رابطه با حفظ فعالیت ضد میکروبی هستند. دمای اکستروژن به تخریب حرارتی مواد ضد میکروبی بستگی دارد و انرژی مکانیکی مخصوص، شدت شرایط فرآیند را نشان می‌دهد. در روش ریخته‌گری مرطوب (که در آن از حلال‌های خاصی جهت تولید فیلم‌ها و ظروف مثل فیلم سلولز و کلاژن استفاده می‌شود) حلالیت و واکنش‌پذیری مواد ضد میکروبی با حلال‌ها از جمله پارامترهای مهم به‌شمار می‌روند. حلالیت به توزیع یکنواخت مواد ضد میکروبی در مواد پلیمری و واکنش‌پذیری به کاهش فعالیت مواد ضد میکروبی واکنش‌دهنده بستگی دارد. ماهیت شیمیایی مواد ضد میکروبی نیز یک پارامتر مهم محسوب می‌شود. برخی از مواد ضد میکروبی محلول در آب بوده اما برخی دیگر محلول نیستند. اگر مواد ضد میکروبی محلول در آب با پلاستیکی‌های رزینی مخلوط شوند تا فیلم‌های ضد میکروبی تولید شود، برای دستیابی به فیلم‌هایی با کیفیت بالا باید توجه خاصی روی خصوصیات فیلم‌ها داشته باشیم. به‌خاطر ماهیت آب‌دوستی مواد ضد میکروبی در مقایسه با ماهیت آب‌گریزی پلاستیک‌ها، ممکن است فرآیند اکستروژن با مشکلات مختلفی مثل تشکیل منافذ در فیلم‌ها، کاهش یک‌پارچگی فیزیکی یا کاهش شفافیت روبرو شود. بنابراین سازگاری مواد ضد میکروبی با مواد بسته‌بندی یک پارامتر مهم محسوب می‌شود. فعالیت بسیاری از مواد ضد میکروبی در پاسخ به pH تغییر می‌کند. pH سامانه‌های بسته‌بندی اغلب به pH مواد بسته‌بندی شده بستگی دارد. بنابراین توجه به ترکیب مواد غذایی با ماهیت شیمیایی مواد ضد میکروبی و هم‌چنین توجه به خصوصیات مواد بسته‌بندی با ماهیت شیمیایی مواد از اهمیت خاصی برخوردار است [۵۰].

۹-۲- خصوصیات فیزیکی مواد بسته‌بندی

یک‌پارچگی فیزیکی و مکانیکی مواد بسته‌بندی تحت تأثیر مواد ضد میکروبی ممزوج شده قرار می‌گیرد. اگر مواد ضد میکروبی با مواد بسته‌بندی سازگار باشند و با برهم‌کنش‌های پلیمر/ پلیمر دخالت نداشته باشند، میزان مناسبی از مواد ضد میکروبی را بدون هر گونه تخریب در یک‌پارچگی مکانیکی و فیزیکی می‌توان به مواد بسته‌بندی اضافه کرد. البته مقادیر بیش از حد مواد ضد میکروبی که قادر به مخلوط شدن با مواد ضد میکروبی نیستند، قدرت فیزیکی و یک‌پارچگی مکانیکی را کاهش خواهند داد. مواد ضد میکروبی با اندازه کوچک می‌توانند با مواد پلیمری مخلوط شوند و ممکن است در مناطق بی‌شکل پلیمر قرار بگیرند. اگر مواد ضد میکروبی بیش از حد با مواد بسته‌بندی مخلوط شوند، مناطق بی‌شکل ممکن است اشباع شوند و مواد ضد میکروبی اضافی با برهم‌کنش‌های پلیمر/ پلیمر در مناطق بلوری پلیمر واکنش خواهند داد. اگرچه با افزودن سطوح پایینی از مواد ضد میکروبی در یک‌پارچگی فیزیکی آسیبی به‌وجود نمی‌آید، اما خصوصیات نوری می‌تواند تغییر کند و می‌توان به کاهش شفافیت و تغییر رنگ مواد بسته‌بندی اشاره کرد[۴۸].

۹-۳- دمای انبارداری

دمای انبارداری می تواند فعالیت ضد میکروبی و آهنگ مهاجرت مواد ضد میکروبی و جمعیت میکروبی را تحت تأثیر قرار دهد. با افزایش دما، سرعت انتشار و مهاجرت مواد ضد میکروبی افزایش می‌یابد، در حالی‌که طی نگهداری در یخچال سرعت انتشار کاهش می‌یابد. سرعت رها شدن این مواد باید طوری باشد که همیشه غلظت مواد ضد میکروبی بالاتر از غلظت بازدارندگی بحرانی باقی بماند.

بنابراین، برآورد دمای نگه‌داری در طی انبارداری، توزیع و حمل و نقل می‌تواند در تعیین فعالیت ضد میکروبی باقی مانده مؤثر باشد. دماهای بالا فراریت مواد ضد میکروبی را افزایش می‌دهند. لذا اگر مواد ضد میکروبی فرار یا نسبتاً فرار مورد استفاده قرار گرفته باشند، با تبخیر مواد فعال، فعالیت ضد میکروبی کاهش خواهد یافت. دما هم‌چنین یک پارامتر بحرانی در رشد میکروبی است. هر میکروارگانیسم عکس العمل متفاوتی نسبت به دماهای مختلف دارند و دمای بهینه رشد مخصوص به خود را دارد. کنترل دمای انبارداری یک روش مؤثر در جلوگیری از آلودگی میکروبی مواد غذایی به‌حساب می‌آید[۵۰].

۹-۴- فناوری رهایش کنترل شده

در طراحی سامانه‌های ضد میکروبی باید بین رهایش مواد ضد میکروبی و سینتیک رشد میکروبی یک تعادل برقرار باشد. هنگامی‌که میزان انتقال جرم مواد ضد میکروبی، سریع‌تر از میزان رشد میکروارگانیسم‌های هدف باشد، قبل از این‌که طول مدت نگه‌داری مورد انتظارکامل شود، غلظت مواد ضد میکروبی کمتر از غلظت مؤثر (MIC) خواهد بود و سامانه فعالیت ضد میکروبی خود را از دست می‌دهد، زیرا حجم مواد غذایی در مقایسه با مواد ضد میکروبی بسیار زیاد است. در نتیجه، رشد میکروارگانیسم‌ها به‌دنبال تخلیه مواد ضد میکروبی، شروع خواهد شد. در مقابل، هنگامی‌که میزان مهاجرت خیلی آهسته باشد، قبل از این‌که مواد ضد میکروبی آزاد شوند، رشد میکروارگانیسم‌ها شروع می‌شود. بنابراین میزان رهایش مواد ضد میکروبی از مواد بسته‌بندی به سطح مواد غذایی باید کنترل شده باشد تا میزان انتقال جرم با سینتیک رشد میکروبی متناسب باشد [۵۱].

۹-۵- ضریب انتقال جرمی

بحث کنترل میزان رهایش و مهاجرت مواد ضد میکروبی از بسته غذایی موضوع بسیار مهمی در طراحی فیلم‌ها است و نیازمند استفاده از روش‌های مناسب همراه با طراحی مدل‌های پیشگوی ریاضی است. ساده‌ترین روش برای کنترل رهایش ترکیب ضدمیکروبی، استفاده از بسته‌های چند لایه است. در این روش، ترکیبات ضد میکروبی به‌صورت یک لایه نازک روی فیلم اضافه می‌شود تا رهایش آن تحت کنترل ضخامت فیلم باشد [۳۹].

۹-۶- خصوصیات ماده ضد میکروبی و غذا

ترکیبات و خصوصیات غذا نقش مهمی در اثربخشی و آزاد شدن مواد ضد میکروبی از فیلم به غذا دارند. pH غذا با ایجاد تغییرات یونی، می‌تواند خصوصیات ضد میکروبی برخی از مواد از جمله اسیدهای آلی و نمک‌های آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. از طرفی رهایش ترکیبات مثل اسید سوربیک در غذاهای با pH بالا کاهش می‌یابد. میزان a_w ماده غذایی، بار میکروبی و غیره نیز اثرات مشابهی ایجاد می‌کنند [۳۴].

۱۰- ارزیابی ویژگی‌های ضد میکروبی بسته‌بندی‌های ضد میکروبی

خواص ضد میکروبی بسته‌بندی‌های ضد میکروبی را می‌توان با استفاده از انواع مختلف میکروارگانیسم‌ها و روش‌های مختلف:

- ارزیابی انتشار دیسک آگار
- شمارش تعداد جمعیت میکروبی پلیت
- تست تلقیح سطح فیلم

مورد ارزیابی قرار داد. این روش‌ها برای ارزیابی عملکرد فیلم ضد میکروبی در شرایط آزمایشگاهی به‌کار گرفته می‌شوند. با این وجود، زمانی‌که پوشش‌ها روی مواد غذایی استفاده می‌شوند، کارایی آن‌ها از طریق شمارش جمعیت میکروبی بومی یا تلقیح شده در طی نگه‌داری مواد غذایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، همان‌طور که نتایج یک پژوهش نشان داد که استفاده از فیلم کیتوزان خالص منجر به کاهش باکتری‌های بیماری‌زا در محصولات گوشتی شد [۵۲].

۱۱- جوانب قانونی استفاده از فیلم و پوشش‌های خوراکی ضد میکروبی

تأکید بیشتر بر ویژگی‌های ایمنی عوامل میکروبی افزوده شده و ماهیت فیلم یا پوشش، از موضوعات و دغدغه‌های در حال ظهور در توسعه فناوری بسته‌بندی است و نقش مهمی در تولید سامانه‌های بسته‌بندی ایفا می‌کند. در کنار هزینه تولید، موضع الزامات و محدودیت‌های قانونی استفاده از فیلم‌های خوراکی، مهم‌ترین چالش پیش روی دست‌اندرکاران بسته‌بندی مواد غذایی است. با توجه به این‌که فیلم و پوشش خوراکی به‌عنوان ماده غذایی، جز غذایی، افزودنی یا ماده در تماس با غذا قلمداد می‌شود، لذا تمامی مواد مورد استفاده در تهیه فیلم (پلیمر، ترکیبات ضد میکروبی و افزودنی‌ها) باید کلیه استانداردهای لازم (هم‌چون GRAS، غیر سمی، غیر آلرژن و ...) را دارا باشند و این اطلاعات به شکل لازم روی برچسب فرآورده درج شود. روند بررسی و تعیین پذیرش ترکیبات مورد استفاده در فیلم‌ها، مشابه پروتکلی است که برای فرمولاسیون‌های معمول غذایی صورت می‌پذیرد. از طرفی، برخی از مواد مورد استفاده در تولید فیلم مانند کازئین، پروتئین‌های آب‌پنیر، گلوتن گندم و پروتئین سویا حاوی مواد آلرژن‌اند که نیازمند توجه جدی است. از دیگر جوانب مهم در زمینه کاربرد این نوع بسته‌بندی، اثرات استفاده از آن‌ها بر خصوصیات حسی ماده غذایی است، موضوعی که در مطالعات مرتبط با فیلم‌های خوراکی مورد بی‌توجهی زیادی است. اثرات این فیلم‌ها بر خصوصیات حسی نظیر بو، طعم، مزه، رنگ و ساختار ماده غذایی در هر محصولی بر رغبت مصرف‌کننده برای استفاده از محصولی با این نوع بسته‌بندی بسیار تأثیرگذار است [۵۳].

۱۲- وضعیت نظارت بر بسته‌بندی‌های ضد میکروبی

در دهه گذشته، پیشرفت فناوری در بسته‌بندی مواد غذایی و محصولات کشاورزی برای جلوگیری از تخریب میکروبی ایجاد شده است. نظارت بر وضعیت بسته‌بندی ضد میکروبی منجر به

بهبود کارایی سامانه ضد میکروبی می‌شود. با وجود مطالعات گسترده در مورد مزایای بسته‌بندی ضد میکروبی، هم‌چنان چندین نگرانی مانند کنترل رهایش ماده ضد میکروبی به بسته-بندی، حفظ کیفیت (فیزیکی و مکانیکی) بسته‌بندی و اطمینان از ایمنی مواد غذایی وجود دارد [۵۴]. در نتیجه، به‌منظور حفاظت از مصرف‌کننده، باید خطرات احتمالی ناشی از مواجهه با این ترکیباتی که ممکن است به داخل مواد غذایی مهاجرت کنند مورد ارزیابی قرار گیرند [۵]. سامانه‌های بسته‌بندی فعال ضد میکروبی باید با رعایت استانداردهای چند مرجع نظارتی مانند سازمان غذا و دارو (ایالات متحده آمریکا)، سازمان ایمنی غذای اروپا (اتحادیه اروپا) و ... به کار گرفته شود. این مراجع قانونی، پایه و اساس قانونی برای استفاده صحیح، ایمن و بازاریابی بسته-بندی‌های ضد میکروبی ایجاد می‌کنند [۱۱، ۵۵]. ترکیب فعال (ماده ضد میکروبی) و حامل بی اثر، دو ترکیب اولیه در یک سامانه ضد میکروبی فعال هستند. عوامل فعال به‌طور هدفمند از سامانه بسته‌بندی به ماده غذایی آزاد می‌شوند. از این‌رو آن‌ها باید استانداردهای علم و فناوری را رعایت کنند و حامل باید معیارهای ایمنی مواد در تماس با غذا را برآورد کند [۵۶]. در اغلب مواقع، به‌منظور جلوگیری از مهاجرت ترکیبات نامطلوب به غذا، استانداردهای مربوط به مواد در تماس با غذا سخت‌گیرانه هستند. درک انتخاب‌های نظارتی مناسب و نیز مشکلات پایداری زیست محیطی به تلاش برای تجاری‌سازی آن‌ها کمک می‌کند. در نهایت، پذیرش مصرف‌کننده و تقویت قصد خرید این محصولات افزایش می‌یابد.

۱۳- چشم‌انداز آینده

بسته‌بندی ضد میکروبی در پتانسیل زیادی جهت کاربرد در مواد غذایی دارد زیرا آن می‌تواند رشد میکروبی در سامانه‌های غذایی را به حداقل برساند و ماندگاری محصول را افزایش دهد. ترکیب روش‌های نگه‌داری مانند روش‌های حرارتی یا اتمسفر تغییر یافته با بسته‌بندی ضد میکروبی می‌تواند منجر به فعالیت هم‌افزایی شود و با استفاده از حداقل سطح مواد ضد میکروبی، ایمنی مواد غذایی را بهبود بخشد. محلول‌های بسته‌بندی ضد میکروبی به‌گونه‌ای طراحی شدند تا مواد ضد میکروبی را به شیوه‌ای تنظیم شده آزاد کنند. پلیمرهای کلاسیک، هیدروژل‌های جدید دارای سطوح دارای گروه‌های عملکردی و پلیمرهای زیستی بسیار متورم همگی حامل‌های ضد میکروبی امیدوارکننده‌ای در این زمینه هستند. نانو فناوری و میکرو و نانو کپسوله‌کردن، راه حل‌های خلاقانه در حال ظهور برای تولید مواد غذایی ایمن‌تر، سالم‌تر و مغذی‌تر هستند. از میان بقیه موارد، پلیمرهای زیستی غذایی به‌ویژه هیدروکلوئیدها مواد جالبی برای تولید حامل‌های در مقیاس میکرو و نانو برای حمل مواد شیمیایی زیست فعال هستند. [۲۰].

۱۴- نتیجه‌گیری

بسته‌بندی ضد میکروبی از رایج‌ترین کاربردهای تکنولوژی‌های بسته‌بندی فعال می‌باشد. فناوری بسته‌بندی ضد میکروبی به سرعت در حال پیشرفت و اختصاص دادن سهم بیشتری از بازار جهانی به خود است. در بسته‌بندی ضد میکروبی، عوامل ضد میکروبی یا مواد موجود در شبکه پلیمری با هدف قرار دادن میکروارگانیسم‌های عامل فساد یا باکتری‌های بیماری‌زای غذا و ممانعت یا کاهش رشد آن‌ها منجر به افزایش ماندگاری مواد غذایی می‌شوند. در بسته‌بندی‌های قدیمی، مواد ضد میکروبی را مستیقماً به فرمولاسیون اولیه مواد غذایی اضافه می‌کردند یا این‌که مواد ضد میکروبی را از طریق پاشش، غوطه‌ور کردن و غیره در سطح مواد غذایی به‌کار می‌بردند. افزودن مستقیم مواد ضد میکروبی به مواد غذایی دارای معایبی از جمله کاهش غلظت مواد ضد میکروبی در سطح مواد غذایی به‌دلیل انتشار این مواد به بخش‌های درونی طی مرور زمان و در نتیجه آن کاهش کارایی مواد ضد میکروبی، خنثی شدن در اثر واکنش با ترکیبات مواد غذایی و تغییر در طعم و مزه مواد غذایی می‌باشد. بسته‌بندی ضد میکروبی می‌تواند روش مناسبی برای رفع این مشکلات باشد که از طریق آن هم می‌توان به مشکلات ناشی از افزودن مستقیم مواد ضد میکروبی غلبه کرد و هم‌چنین کیفیت و مدت نگهداری مواد غذایی را بهبود بخشید. در بسته‌بندی ضد میکروبی فعالیت یک عامل ضد میکروبی یا از طریق تماس میکروارگانیسم‌ها با سطح داخلی مواد بسته‌بندی و یا به‌طور مستقیم در ماده غذایی از طریق انتشار تدریجی عامل ضد میکروبی از مواد بسته‌بندی به غذا انجام می‌شود. درک کامل بسته‌بندی ضد میکروبی محققان و صنایع غذایی را قادر می‌سازد تا روش‌های مناسبی برای کاهش خطرات میکروبی و بهبود کیفیت مواد غذایی به‌کار گیرند. انتخاب بهترین سامانه بسته‌بندی ضد میکروبی برای یک محصول امری ضروریست. در این انتخاب عواملی مانند ماهیت محصول، شرایط نگه‌داری، دوره ماندگاری مورد نیاز و الزامات قانونی تعیین‌کننده هستند. استفاده هم‌زمان از ترکیبی از روش‌های نگه‌داری مانند روش‌های حرارتی یا اتمسفر تغییر یافته با بسته‌بندی ضد میکروبی نیز می‌تواند منجر به ایجاد اثر هم‌افزایی شود و با استفاده از به‌کارگیری حداقل مواد ضد میکروبی، ایمنی مواد غذایی را بهبود بخشد. هم‌چنین نانو فناوری و میکرو و نانو کپسوله کردن ترکیبات ضد میکروبی نیز راه حل‌های خلاقانه در حال ظهور برای تولید مواد غذایی ایمن‌تر، سالم‌تر و مغذی‌تر هستند. شایان ذکر است استفاده از سامانه‌های بسته‌بندی فعال ضد میکروبی مستلزم رعایت استانداردهای چند مرجع نظارتی

مانند سازمان غذا و دارو (ایالات متحده آمریکا)، سازمان ایمنی غذای اروپا (اتحادیه اروپا) و ... می‌باشد.

۱۵- مراجع

[1]. P. Bagheri and N. Sedaghat, "Food safety by buying from plastic packaging," Packaging Sciences and Techniques, Scientific Journal, Year 12, vol. 47, pp. 1-8. (In Persian)

[2]. M. Rojas-Graü, R. Avena-Bustillos, C. Olsen, M. Friedman, P. Henika, O. Martín-Belloso, Z. Pan, and T. McHugh, "Effects of plant essential oils and oil compounds on mechanical, barrier and antimicrobial properties of alginate–apple puree edible films," Journal of Food Engineering, vol. 81, pp. 634-641, 2007.

[3]. V. A. Jideani and K. Vogt, "Antimicrobial packaging for extending the shelf life of bread—A review," Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 56, pp. 1313–1324, 2016.

[4]. K.V.P. Kumar, J. Suneetha and B.A. Kumari, "Active packaging systems in food packaging for enhanced shelf life," Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, vol. 7, pp. 2044–204, 2018.

[5]. S. Quintavalla and L. Vicini, "Antimicrobial food packaging in meat industry," Meat Science, vol. 62, pp. 373–380, 2002.

[6]. C. Vasile and M. Baican, 'Progresses in food packaging, food quality, and safety—Controlled-release antioxidant and/or antimicrobial packaging," Molecules, vol. 26, pp. 1263, 2021.

[7]. R. W. Anwar and E. Warsiki, "The comparison of antimicrobial packaging properties with different applications incorporation method of active materia," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES), 141, 012002, 2018.

[8]. S. A. Sofi, J. Singh, S. Rafiq, U. Ashraf B. N. Dar and G. A. Nayik, "A comprehensive review on antimicrobial packaging and its use in food packaging," Current Nutrition and Food Science, vol. 14, pp. 305–312, 2018.

[9]. P. Suminska, B. Marcos, and V. Coma, "Active packaging applications for food," Food Science and Food Safety, vol. 17, pp.165–199, 2018.

[10]. T. Fadiji, M. Rashvand, M. O. Daramola and S. A. Iwarere, "A Review on Antimicrobial Packaging for Extending the Shelf Life of Food," Processes, vol. 11, 590. Academic Editor: Yixiang Wang, 2023.

[11]. C. Vilela, M. Kurek, Z. Hayouka, B. Röcker, S. Yildirim, M.D.C. Antunes and C.S. Freire, "A concise guide to active agents for active food packaging,"
Trends in Food Science and Technology, vol.
80, pp. 212–222, 2018.

[12]. S. Yildirim, B, Röcker, M.K. Pettersen, J. Nilsen-Nygaard, Z. Ayhan, R. Rutkaite and T. Radusin.

[13]. L. J. Bastarrachea, D.E. Wong, M. J. Roman, Z. Lin and J.M. Goddard, "Active packaging coating,". Coatings, vol. 5, pp. 771–791, 2015.

[14]. M. Dhanasekar, V. Jenefer, R.B. Nambiar, S.G. Babu, S.P. Selvam, B. Neppolian and S.V. Bhat, "Ambient light antimicrobial activity of reduced graphene oxide supported metal doped TiO2 nanoparticles and their PVA based polymer nanocomposite films," Materials Research Bulletin, vol. 97, pp. 238–243, 2018.

[15]. J. Ju, X. Chen, Y. Xie, H. Yu, Y. Guo, Y.Cheng and W.Yao, "Application of essential oil as a sustained release preparation in food packaging," Trends in Food Science and Technology, vol. 92, pp. 22–32, 2019.

[16]. S. Mangalassary, "Antimicrobial food packaging to enhance food safety: Current developments and future challenges". Food ProcessTechnolgoy, vol. 3, pp.100, 2012.

[17]. M. C. Giannakourou and T. N. Tsironi, "Application of Processing and Packaging Hurdles for Fresh-Cut Fruits and Vegetables Preservation," Foods, vol. 10, pp. 830, 2021.

[18]. P. Appendini and J.H. Hotchkiss, "Review of antimicrobial food packaging," Innovative Food Science and Emerging Technologies, vol. 3, pp. 113–126, 2002.

[19]. M. Zanetti, T. K. Carniel, F. Dalcanton, R.S. dosAnjos, H.G. Riella, P.H. de Araújo, D. de Oliveira and M.A. Fiori, "Use of encapsulated natural compounds as antimicrobial additives in food packaging: A brief review," Trends in Food Science & Technology, vol. 81, pp. 51–60, 201.

[20]. T. V. Manu, B. Ramachandra and R. Prabha, "Antimicrobial packaging materials for foods," International Research Journal of Modernization In Engineering Technology And Science, 03, 11, 2021.

[21]. J. M. Lagaron, "Chitosan and chitosan blend as antimicrobials". In: P. Fernandez-Saiz, Antimicrobial Polymer New Jersey, John Wiley & Sons, pp.71-101, 2012.

[22]. J. Gómez-Estaca, A. L. De Lacey, M. E. López-Caballero, M. C. Gómez-Guillén and P. Montero, "Biodegradable gelatin–chitosan films incorporated with essential oils as antimicrobial agents for fish preservation," Food Microbiology, vol. 27, pp. 889–896, 2010.

[23]. X. L. Shen, J.M.Wu, Y, Chen and G. Zhao, "Antimicrobial and physical properties of sweet potato starch films incorporated with potassium sorbate or chitosan," Food Hydrocolloids, vol. 24, pp. 285–290, 2010.

[24]. S. Y. Sung, L.T. Sin, T.T. Tee, S.T. Bee, A.R. Rahmat, W.A. Rahman and M. Vikhraman, "Antimicrobial agents for food packaging applications," Trends in Food Science and Technology, vol. 33, pp.110–123, 2013.

[25]. M. Z. Treviño-Garza, S. García, M. del Socorro Flores-González and K. Arévalo-Niño, "Edible active coatings based on pectin, pullulan, and chitosan increase quality and shelf life of strawberries (Fragaria ananassa)," Food Science, vol. 80, pp. 1823–1830, 2015.

[26]. Ç. Soysal, H. Bozkurt, E. Dirican, M. Güçlü, E. D. Bozhüyük, A. E. Uslu and S. Kaya, "Effect of antimicrobial packaging on physicochemical and microbial quality of chicken drumsticks," Food Control, vol. 54, pp. 294–299, 2015.

[27]. R. Gherardi, R. Becerril, C. Nerin and O. Bosetti, "Development of a multilayer antimicrobial packaging material for tomato puree ing an innovative technology," LWT-Food Science and Technology, vol. 72, pp. 361–367, 2016.

[28]. A. C. Da Rocha Neto, R. Beaudry, M. Maraschin, R. M. Di Piero and E. Almenar, "Double-bottom antimicrobial packaging for apple shelf-life extension," Food Chemistry, vol, 279, pp. 379–388, 2019.

[29]. Y. Xiong, Li. S. Warner, R. D. Fang, "Effect of oregano essential oil and resveratrol nanoemulsion loaded pectin edible coating the preservation of pork loin in modified atmosphere packaging". Food Control, vol. 114, pp.107226, 2020.

[30]. F. Hemmatkhah, F. Zeynali and H. Almasi, "Encapsulated cumin seed essential oil-loaded active papers: Characterization and evaluation of the effect on quality attributes of beef hamburger," Food Bioprocess Technology, vol. 13, pp. 533–547, 2020.

[31]. P. M. Davidson and S. Zivanovic, "The use of natural antimicrobials". In: P. Zeuthen, L. Bogh-Sorensen, editors, Food preservation technologies, Woodheas Publishing Limited and CRC Press, 2003.

[32]. D. S. Lee, "Packaging containing natural antimicrobial or antioxidative agents" In: H. H. Jung, Innovations in Food Packaging, London, Academic Press, pp. 108-122, 2005.

[33]. H. Thormar, "Lipids and Essential Oils as Antimicrobial Agents," Wiley, 2010.

[34]. V. Coma, "Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat- based producta". Meat Science, vol. 78 (1-2), pp. 90-103, 2008.

[35]. A. Naidu, "Natural food antimicrobial systems": CRC press, 2010.

[36]. J. R. Calo, P. G. Crandall, C. A. Obryan and S. C. Ricke, "Essential oils as antimicrobials in food systems- A review," Food Control, vol. 54 pp. 111-9, 2015.

[37]. J. H. Han, "Antimicrobial packaging systems," In: H. H. Jung, Innovations in Food Packaging London, Academic Press, Pp:80-107. 2000.

[38]. A. Cagri, Z. Ustunol, W. Osburn, and E. T. Ryser, "Inhibition of Listeria monocytogenes on hot dogs using antimicrobial whey protein-based edible casing," Food Sciences. vol. 68, pp. 291–299, 2003.

[39]. M. Moradi, "Investigation on development of chitosan antimicrobial edible film for mortadella sausage". Faculty of Veterinary Medicine: Urmia University. 2011.
[40]. C. Campos, L. Gerschenson and S. Flores, "Development of edible films and coatings with antimicrobial activity," Food Biotechnology, vol. 6, pp. 849-875, 2011.
[41]. B. Ouattara, R. E. Simard, G. Piette, A. Begin and R. A. Holley, "Inhibition of surface spoilage bacteria in processed meats by application of antimicrobial flms prepared with chitosan". International Journal of Food Microbiology, vol. 62, pp.139–148, 2000.
[42]. G. R. Siragusa, and J. S. Dickson, "Inhibition of Listeria monocytogenes, Salmonella Typhimurium and Escherichia coli O157:H7 on beef muscle tissue by lactic or acetic acid contained in calcium alginate gels," Food safety, Vol. 13. pp.147–158, 1993.
[43]. A. Cagri, Z. Ustunol and E. T. Ryser, "Antimicrobial, mechanical, and moisture barrier properties of low pH whey proteinbased edible flms containing p-aminobenzoic or sorbic acids," Food Science. vol. 66, pp. 865–870, 2001.
[44]. A. Cagri, Z. Ustunol and E. T. Ryser. "Inhibition of three pathogens on bologna and summer sausage slices using antimicrobial edible flms," Food Science, vol. 67, pp. 2317–2324, 2002.
[45]. E. Carlin, N. Gontard, M. Reich, and C. Nguyen, "Utilization of zein coating and sorbic acid to reduce Listeria monocytogenes growth on cooked sweet corn," Food Science. Vol. 66, pp. 1385–1389, 2001.
[46]. R. V. Orr, I. Y. Han, J. C. Acton, and P. L. Dawson, "Effect of nisin in edible protein lms on Listeria monocytogenes viability in milk," Food Packag. Syst. Inc. 50/51, pp.300–305, 1999.
[47]. J. K. Baron, "Inhibition of Salmonella Typhimurium and Escherichia coli O157:H7 by an antimicrobial containing edible film". M.S. thesis. University of Nebraska, Lincoln, 1993.
[48]. J. H. Han, "Antimicrobial food packaging," Food Technology, vol. 54, pp. 56-65, 2000.
[49]. J. H. Han, "Antimicrobial food packaging". Novel food packaging technologies, vol. 8, pp. 50–70, 2003.
[50]. R. Ahvenainen, "Active and intelligent packagin," In: R. Ahvenainen, Novel food pack tech pp. 5-19. Woodhead Publishing Limited, Abington, 2003.
[51]. A. K. Anal and H. Singh, "Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery," Trends in Food Science & Technology, vol. 18 (5), pp. 240-251, 2007.
[52]. M Yousefi, M. Azizi and A. Ehsani, "Antimicrobial coatings and films on meats: A perspective on the applicationof antimicrobial edible films or coatings on meats from the past to future," Bali Medical, vol. 7, pp. 87–96, 2018.
[53]. Z. Ustunol, "Edible films and coatings for meat and poultry" In: Embuscado M. E. Huber, K. C. DITORS, Edible films and coatings for food applications: Springer; 2009.
[54]. A. D. Karaman, B. Özer, M. A. Pascall, and V. Alvarez, "Recent advances in dairy packaging," Food Reviews International, vol. 31, pp. 295–318, 2015.
[55]. D. Restuccia, U.G. Spizzirri, O. I. Parisi, G. Cirillo, M. Curcio, F. Iemma, N. Picci, "New EU regulation aspects and global market of active and intelligent packaging for food industry application," Food Control, vol. 21, pp. 1425–1435, 2010.
[56]. A. E. Kapetanakou and P. N. Skandamis, "Applications of active packaging for increasing microbial stability in foods: Natural volatile antimicrobial compound," Current Opinion in Food Science, vol. 12, pp. 1–12, 2016.