

A Review of Application and Mechanism of the Effect of Oxygen Absorbers in Food Packaging

Naser Sedaghat*, mohammadkazem Heydarian, alireza Heydarian

* Professor Food Industry, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 21/02/2023; Accepted: 20/05/2023)

Abstract

Oxygen can reduce the quality and shelf life of some foods. The reason for the presence of oxygen in food packaging is mainly due to oxygen residues in the food, oxygen residues in the closed space, raw materials and damage to the containers during the packaging process. Basically, oxygen can cause food spoilage in various ways, including oxidative spoilage, which leads to a decrease in the quality of fats and fatty parts of food, oxidation of lipids, changes in the structure of proteins, vitamins and pigments, and providing suitable conditions for the growth of microorganisms and enzymatic browning. Researches show that various methods can be used to reduce the amount of this oxidative factor, including modified atmosphere packaging (MAP), vacuum packaging, and oxygen absorbers. In this review study, the mechanisms and applications of oxygen absorbers in the food industry and packaging of various food products were discussed. Studies show that the use of oxygen absorbers will have beneficial effects in increasing the quality and shelf life of various food products and reducing the wastage of food resources. Considering the importance of this issue, we can take steps towards the production, mass production and presentation of new formulations in the oxygen absorber production industry.

Keywords: Oxygen Absorbers, Oxidative Deterioration, Material Packaging

*Corresponding Author E-mail: sedaghat@um.ac.ir

کاربرد و مکانیسم اثر جاذب‌های اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی

ناصر صداقت^{۱*}، محمد کاظم حیدریان^۲، علیرضا حیدریان^۳

۱- استاد ۳ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع غذایی گرایش فناوری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، شهر مشهد، کشور ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰)

چکیده

اکسیژن می‌تواند باعث افت کیفیت و کاهش ماندگاری در بعضی از مواد غذایی شود دلیل وجود اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی عمدتاً به خاطر بقایای اکسیژن موجود در غذا، بقایای اکسیژن موجود در فضای سر بسته، مواد اولیه و آسیب به ظروف در فرایند بسته‌بندی است. اساساً اکسیژن می‌تواند از راه‌های مختلفی باعث فساد ماده غذایی شود از جمله فساد اکسیداتیو که منجر به کاهش کیفیت در چربی‌ها و بخش‌های چرب ماده غذایی، اکسیداسیون لیپیدها، تغییر ساختار پروتئین‌ها، ویتامین‌ها و رنگ‌دانه‌ها و فراهم کردن شرایط مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها و قهوه‌ای شدن آنزیمی شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که می‌توان برای کاهش میزان این عامل اکسیداتیو از روش‌های متنوعی از جمله بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح شده (MAP)، بسته‌بندی تحت خلا و جاذب‌های اکسیژن استفاده نمود. در این مطالعه مروری به مکانیسم‌ها و کاربردهای جاذب‌های اکسیژن در صنعت غذا و بسته‌بندی مواد غذایی مختلف پرداخته شد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که استفاده از جاذب‌های اکسیژن اثرات مفیدی در افزایش کیفیت و عمر ماندگاری محصولات غذایی مختلف و کاهش هدررفت منابع غذایی خواهند شد. با توجه به اهمیت این موضوع می‌توان در راستای تولید، انبوه‌سازی و ارائه فرمولاسیون‌های نوین در صنعت تولید جاذب‌های اکسیژن گام برداشت.

کلیدواژه‌ها: جاذب‌های اکسیژن، فساد اکسیداتیو، بسته‌بندی مواد غذایی

۱- مقدمه

سیستم‌هایی مانند جاذب‌های اکسیژن، دی‌اکسید کربن، اتیلن، رطوبت و منتشرکننده‌های دی‌اکسید کربن و اتانول از سیستم‌های مهم بسته‌بندی فعال هستند [۳]. یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین نوع بسته‌بندی‌های فعال جاذب‌های اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی هستند که این جاذب‌ها بر اساس مکانیسم‌های مختلف با اکسیژن وارد واکنش شده و با بیرون راندن آن باعث حفظ تمام خصوصیات مواد غذایی از جمله: عطر، طعم، رنگ و ارزش تغذیه‌ای می‌شوند و در نهایت کیفیت کنترل‌شده محصول و عمر ماندگاری بالا محصول را برای مصرف‌کننده به دنبال دارند [۴].

از معایب حضور میزان زیاد اکسیژن در بسته‌بندی برخی مواد غذایی، افزایش رشد حشرات و میکروارگانیسم‌های هوازی، تغییرات نامناسب طعمی و عطری و رنگی و افت مواد مغذی می‌باشد. از سوی دیگر اکسیژن باقی‌مانده با فرآورده غذایی داخل بسته غذایی واکنش می‌دهد و تأثیرات نامطلوبی ایجاد می‌کند که نهایتاً کاهش عمر انباری و افت کیفیت حاصل آن خواهد بود. با توجه به مطالب ذکر شده کنترل حضور یا عدم حضور اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی مختلف، امری مهم و ضروری تلقی می‌شود

اکسیژنی که در بسته‌بندی مواد غذایی باقی می‌ماند می‌تواند تأثیرات مخربی روی کیفیت و عمر ماندگاری فرآورده نهایی باقی بگذارد. از طرف دیگر نیز اکسیژن می‌تواند بعد از بسته‌بندی از لفاف بسته‌بندی وارد فضای بالا آن شود. البته همیشه نبود اکسیژن در بسته نامطلوب نخواهد بود، بلکه در بعضی موارد مانند میوه‌ها و سبزیجات عدم حضور اکسیژن باعث تخمیر و در نهایت ایجاد ترشیدگی در محصول نهایی می‌شود یا در بسته بندی گوشت تازه نیز نبود اکسیژن در بسته باعث تبدیل رنگ دانه قرمز میوگلوبین به مت میوگلوبین قهوه‌ای خواهد شد [۱]. امروزه در امر بسته‌بندی مواد غذایی یکی از ابتکارات استفاده از بسته‌بندی فعال و هوشمند است که بر اساس واکنش متقابل بین محیط غذا و ماده غذایی بنا گذاشته شده است که در نهایت به کیفیت بالا ماده غذایی می‌پردازد و باعث کاهش مشکلات زیست محیطی و آلودگی خواهد شد [۲]. این عمل عمر ماندگاری ماده غذایی را افزایش داده و در جهت بهبود ویژگی‌های ارگانولپتیکی و ایمنی غذا گام برمی‌دارد.

* رایانامه نویسنده مسئول: sedaghat@um.ac.ir



هم می توانست اکسیژن را در خود حل کند و هم برای واکنش برای اکسیژن نوعی محیط تلقی می شد یک شرکت ژاپنی در سال ۱۹۹۰ میلادی جاذب اکسیژن حاوی آهن احیا را به کمک روش کو اکستروژن بین دولایه ی مواد بسته بندی قرار داد که در این روش لایه ی نفوذناپذیر به اکسیژن لایه ی بیرونی بود و نفوذپذیر به اکسیژن لایه داخلی بود. در ادامه ی روند تکاملی جاذب های اکسیژن شرکت ژاپنی دیگری کیسه های حاوی مواد جاذب اکسیژن را بین دولایه ی ماده ی بسته بندی قرار داد در این روش هوای داخل بسته از خلل و فرج موجود در روی لایه ی داخلی عبور می کرد و با جاذب اکسیژن وارد واکنش می شد [۷]. همچنین استفاده از هیدروکربن های غیراشباع نوع دیگری از تکنولوژی جاذب های اکسیژن در فیلم های پلاستیکی بود شرکت مولتی سرب در سال ۱۹۹۱ میلادی بسته هایی تولید کرد که کیسه های حاوی جاذب های اکسیژن که به صورت برچسب روی دیواره ی داخلی آن ها چسبانده شده بوده را تولید کرد [۸]. امروزه این جاذب های اکسیژن در مقیاس نانو می توانند مورد استفاده قرار گیرند. در مطالعه انجام شده توسط فولتینوویچ و همکاران (۲۰۱۷) [۸]، نشان داده شد که ظرفیت جذب اکسیژن آهن در مقیاس نانو در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد و در شرایط خشک ده برابر بیشتر از نمونه ی تجاری موجود بر پایه آهن در یک ماتریس پلی اتیلن یا پلی پروپیلن در مقیاس غیر نانو بود. مطالعه انجام شده توسط سیچلو و همکاران (۲۰۱۵) [۹]، نشان می دهد که در حال حاضر مؤثرترین و پر مصرف ترین جاذب های اکسیژن، ساشه های جاذب های اکسیژن حاوی پودر آهن هستند. با این حال، این نوع از جاذب ها دارای چندین معایب از جمله ناسازگاری با امواج مایکروویو، فلزیاب های مواد غذایی، و آشکار سازی مواد خارجی اشعه ایکس هستند. علاوه بر این، کیسه های حاوی جاذب های اکسیژن در تماس با مواد غذایی با رطوبت بالا مانند میوه ها، سبزیجات، ماهی، گوشت و محصولات مرتبط می توانند اکسید آهن تولید کنند و مقبولیت ماده غذایی مصرفی را بکاهند که این مشکل را می توان با قراردادن این جاذب ها در مواد پلیمری و یا استفاده به شکل برچسب بر روی بسته ماده غذایی، حل نمود [۱۰].

در مطالعه انجام شده توسط جونگسو لی و همکاران (۲۰۱۸) [۱۱]، یک جاذب اکسیژن غیر آهنی (NFOS) با ترکیب جدید توسعه داده شد که فعالیت مهار اکسیژن بهتری را نسبت به نمونه های تجاری نشان داد که نه تنها اکسیداسیون لیپیدها را مهار کرد، بلکه رشد میکروبی را در نان و گوشت کاهش داد و همچنین می توان از آن به عنوان یک جاذب اکسیژن مناسب برای محافظت از محصولات گوشتی در برابر اکسیداسیون لیپید و آلودگی میکروبی استفاده کرد.

که این موضوع به اهمیت حضور جاذب های اکسیژن در بسته بندی مواد غذایی اشاره دارد [۵].

۱-۱- جاذب اکسیژن

اصطلاح جاذب اکسیژن برای موادی به کار می رود که در داخل بسته قرار داده شده و از طریق واکنش های شیمیایی یا آنزیمی با اکسیژن وارد واکنش شده و غلظت اکسیژن درون بسته را به کمتر از ۰/۰۱ درصد می رسانند و می توانند شروع کننده ی واکنش های اکسیداسیون بوده و یا سرعت بخش این واکنش ها باشد، از طرفی جاذب های اکسیژن این توانایی را دارند که طبق پدیده انتشار و به وسیله ی ایجاد اختلاف فشار جزئی، اکسیژن موجود در بافت ماده غذایی را به فضای داخل بسته بندی منتقل کرده و در نهایت آن را حذف کنند. این جاذب ها با سرعت عملی که دارند می توانند حجم زیادی از اکسیژن را از بین ببرند [۳]. نقش جاذب های اکسیژن از آنجایی پررنگ می شود که روش هایی مانند پر کردن تخت خلأ، بسته بندی با اتمسفر اصلاح شده، پر کردن داغ، تزریق گاز خنثی و دیگر روش های مرسوم نمی توانند به طور کامل اکسیژن موجود در بسته را حذف کنند و معمولاً ۰/۱ تا ۲ درصد از این عامل اکسید کننده در بسته بندی باقی خواهد ماند. از سوی دیگر حتی بسته بندی های غیر قابل نفوذ به اکسیژن نیز نمی توانند به طور کامل از ورود اکسیژن به محیط بسته بندی جلوگیری نمایند. در نتیجه استفاده از این جاذب ها روشی تکمیلی در بسته بندی اتمسفر بهبود یافته و بسته بندی تحت خلأ می باشد [۶].

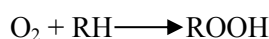
۱-۲- تاریخچه

محققان در سال ۱۹۲۰ میلادی به وسیله ی مخلوطی از مواد جاذب رطوبه سولفات آهن، پودر مس، کلرید آمونیوم توانستند اکسیژن را حذف کنند. همچنین در اوایل دهه ی ۴۰ میلادی قرن بیستم نوعی مواد جذب کننده ی اکسیژن تولید شد که در بسته های مواد غذایی خشک مورد استفاده قرار می گرفت، همچنین طبق تحقیقات انجام شده نشان داده شد که در پلاستیک های چندلایه ای مانند کیسه های انعطاف پذیر می توان از این سیستم استفاده کرد و گاز هیدروژن را به همراه پالادیم در بین لایه ها قرارداد. در سال ۱۹۶۰ میلادی بازار ژاپن میزبان جاذب های اکسیژن هیپوسولفید سدیم و هیدروسولفید شد اما جاذب های نام برده در طی حمل و نقل پایدار مورد انتظار را نداشتند و واکنش های جانبی نامطلوبی را ایجاد می کردند. در سال ۱۹۷۰ میلادی برای اولین بار جاذب های اکسیژن تجاری توسط شرکت میتسوبیشی ژاپن وارد بازار شد و از سوی دیگر محققین استرالیا در سال ۱۹۸۰ میلادی سیستمی بر مبنای واکنش با اکسیژن یگانه ساختند که نوعی فیلم پلیمری بود که

با کاتالیزور پالادیوم، توزیع کاتالیزور را افزایش می‌دهد که منجر به راندمان بالاتر می‌شود. همچنین سدیم و آهن به‌عنوان محرک در واکنش کاتالیزور عمل می‌کنند. این فناوری برای بسته‌بندی مواد غذایی مانند ژامبون، ویتامین C، نوشیدنی‌های نظیر چای و آبمیوه‌ها به کار گرفته شده است [۱۶].

۲-۳- سیستم‌های مهار بر پایه هیدروکربن غیراشباع

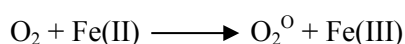
یک تکنیک حذف اکسیژن با ظرفیت بالا شامل اکسیداسیون هیدروکربن‌های غیراشباع برای بسته‌بندی مواد غذایی است. مزیت اصلی این نوع سیستم‌های جمع‌آوری در این است که می‌توان از آن‌ها برای بسته‌بندی غذاهای خشک استفاده کرد. یکی از متداول‌ترین هیدروکربن‌های مورد استفاده برای حذف اکسیژن داخل بسته پلی‌بوتادین به همراه نئودکانوات کبالت به‌عنوان کاتالیزور است. مکانیسم واکنش به‌صورت زیر است:



یکی از معایب عمده این نوع سیستم تولید بوی ناشی از محصولات جانبی است. میراندا و اسپیر (۲۰۰۵)، سیب‌های بریده شده را با یک لایه مهارکننده اکسیژن متشکل از پلی‌آمیدها و پلی‌اتیلن ترفتالات به‌عنوان لایه مانع بسته‌بندی کردند و دریافتند که سرعت انتقال اکسیژن با افزودن لایه مهارکننده اکسیژن کاهش می‌یابد و هیچ تغییری در رنگ سیب‌های بریده شده به وجود نمی‌آید. از سویی دیگر تحقیقات دی مایو و همکاران (۲۰۱۵) به این موضوع اشاره کرد که عدم تغییر رنگ سیب‌های بریده‌شده در حضور اکسیژن، نشان‌دهنده توانایی سیستم به‌عنوان یک جاذب اکسیژن مؤثر است [۱۷].

۲-۴- سیستم‌های مهار مبتنی بر α -توکوفرول

α -توکوفرول یک گزینه امیدوارکننده برای کاربرد بسته‌بندی مواد غذایی است؛ چراکه حذف‌کننده طبیعی رادیکال‌های آزاد می‌باشد [۱۶]. آلفا-توکوفرول به‌طور کلی با یک کاتالیزور ترکیب می‌شود که به دلیل افزایش فعالیت پاک‌سازی، حذف اکسیژن درون بسته را افزایش می‌دهد. واکنش غیر آنزیمی بین اکسیژن و فلز واسطه و به دنبال آن حذف رادیکال‌های آزاد توسط توکوفرول افزایش می‌یابد. برخی از کاتالیزورهای رایج شامل آهن (II)، مس، منگنز و کبالت هستند. مکانیسم مهار توسط بایون، داری، کوسکی، دوسون و وایتساید (۲۰۱۱) [۱۸]، پیشنهاد شده است و به شرح واکنش‌های زیر می‌باشد.

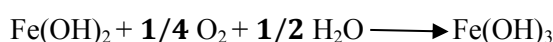
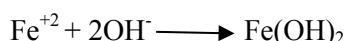
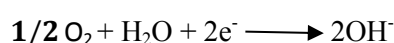


۲-۲- مکانیسم عمل جاذب‌های اکسیژن

جاذب‌های اکسیژن می‌توانند در داخل بسته‌بندی، درب، برچسب بسته‌بندی و در فیلم بسته‌بندی به کار گرفته شوند. در حالت کلی جاذب‌های اکسیژن از مکانیسم‌های زیر استفاده می‌شود:

۱-۲- اکسیداسیون پودر آهن

این جاذب‌ها بر اساس اکسیداسیون در حضور رطوبت هستند [۲]. مکانیسم اکسیداسیون را می‌توان با واکنش‌های زیر توصیف کرد:



طبق مطالعات انجام گرفته توسط کروز (۲۰۰۶) [۱۲]، نشان داده شد که استفاده از بسته‌های کوچک حاوی پودر اکسید آهن به‌عنوان جاذب اکسیژن همراه با فناوری خلأ برای نگهداری لازانیا موجب کندی رشد میکروارگانیسم‌هایی مانند مخمر، کپک‌ها یا کلی‌فرم‌ها شده و این رشد و تا ۳۰ روز به حداکثر حد مجاز نرسیده از آنجا می‌توان توجیه کرد که آهن می‌تواند به‌عنوان یک جاذب مؤثر اکسیژن مورد استفاده قرار گیرد. بکویت و همکاران (۲۰۰۹)، به این موضوع اشاره کردند که پودر آهن همچنین می‌تواند در لایه‌های پلیمری آغشته شود که این کار باعث افزایش سطح خواهد شد و منجر به جذب بهتر اکسیژن می‌شود.

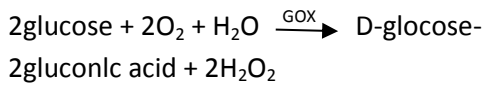
یکی از محدودیت‌های پودر آهن، بی‌اثر بودن آهن فلزی در شرایط خشک است و برای این که بتواند به‌عنوان یک جاذب اکسیژن عمل کند نیاز به رطوبت دارد و کاربردی برای بسته‌بندی محصولات خشک یا حساس به آب ندارد که می‌توان با استفاده از نانو آهن این محدودیت را برطرف کرد [۱۳].

از طرفی دیگر، آنتورسکوف و کوزاک (۲۰۱۷) به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانو آهن هم در حضور رطوبت و هم در محیط بی‌آب، در مقایسه با ذرات آهن در اندازه میکرومتر، ظرفیت مهاری بهتری را نشان می‌دهد.

۲-۲- سیستم‌های مهار بر اساس فلزات گروه پلاتین

پلاتین و پالادیوم به دلیل سمیت کم و کارایی بالا در کاتالیزور تبدیل هیدروژن و اکسیژن به آب به‌طور کلی در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند [۱۴]. بنابراین، در حضور یک اتمسفر اصلاح‌شده حاوی هیدروژن، آن‌ها می‌توانند به‌عنوان یک جاذب اکسیژن برای بسته‌بندی مواد غذایی عمل کنند [۱۵]. افزودن کلر

یا در فرمول وجود داشته باشد و کاتالاز اضافه شده H_2O_2 تشکیل شده در طی واکنش را تجزیه می‌کند [۲۳].



از سویی دیگر طبق تحقیقات انجام گرفته توسط وینسترند و همکاران (۲۰۱۳) [۲۴]، اگزالات اکسیداز (OO_x) همراه با کاتالاز به عنوان یک ماده بسته‌بندی مؤثر استفاده شده است، زیرا توانایی حذف اکسیژن و تولید دی‌اکسید کربن را دارا می‌باشد که در نهایت منجر به افزایش ماندگاری ماده غذایی می‌گردد و در ادامه این فرایند، کاتالاز، پراکسید هیدروژن تولیدشده توسط اگزالات اکسیداز را تجزیه می‌کند.

آنزیم دیگر لاکاز به عنوان جاذب اکسیژن استفاده شده است که در آن لاکازها اکسی ردوکتازهای حاوی مس هستند که از گیاهان و قارچ‌هایی مانند ترامتس و رسیکالر مایسلوپتورا ترموفیلا راس ورنیسفرا به دست می‌آیند [۲۵]. این نوع سیستم مهار اکسیژن برای مواد غذایی با رطوبت بالا به شدت توصیه می‌شود زیرا فعالیت آنزیم‌ها به رطوبت نسبی بالا بستگی دارد.

۲-۷- سیستم‌های مهار مبنی بر میکروارگانسیم‌ها

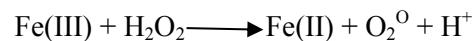
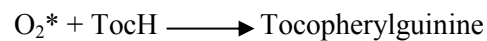
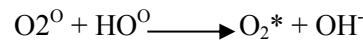
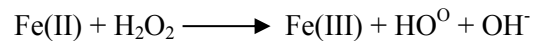
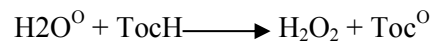
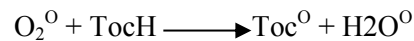
مهار اکسیژن بر اساس میکروارگانسیم‌های محبوس شده در ماتریکس جامد به دلیل طبیعت سازگار با محیط زیست و ارزان بودن آن یک رویکرد جالب است. مخمر خشک تثبیت شده در موم جامد، پارافین یا پارچه به عنوان یک جاذب اکسیژن درجه غذایی استفاده شده است [۲۳]. مخمر هنگامی که با مواد مختلف مانند آب یا اسید اسکوربیک مرطوب می‌شود، فعال می‌شود که به نوبه خود اکسیژن را برای تنفس مصرف می‌کند [۲۵].

سایر میکروارگانسیم‌های هوایی مانند باسیلوس آمیلولیکوفاسینس، کوکوریبا واریانس و پیشیا سوبیلیسوسا نیز برای اهداف مهار اکسیژن استفاده شده‌اند [۲۶].

۳- کاربرد جاذب‌ها اکسیژن در مواد غذایی مختلف

۱-۳- محصولات نان و بیسکویت

استفاده از جاذب‌های اکسیژن به طیف گسترده‌ای از انواع مواد غذایی از جمله نان، کیک و غلات گسترش می‌یابد. طبق مطالعات انجام گرفته توسط برانزون و ساگوی (۱۹۹۸)، بر روی کراکرها طی ۵۲ هفته، استفاده از جاذب‌های اکسیژن در دماهای مختلف ذخیره سازی (۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد) باعث کاهش



مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که برای جلوگیری از تخریب سریع، α -توکوفرول در میکرو ذرات پلی لاکتیک اسید محصور شد یا بر روی فیلم‌های PLA بارگذاری شد [۱۹، ۲۰].

۲-۵- سیستم‌های مهار مبنی بر اسید اسکوربیک

عمل مهار اسید اسکوربیک بر اساس اکسیداسیون اسید اسکوربیک به دهیدروآسکوربیک اسید است. عمل جذب اکسیژن توسط اسید اسکوربیک کند است و در حضور کاتالیزورهایی مانند مس یا آهن افزایش می‌یابد. در مورد اکسیداسیون کاتالیز نشده، سرعت واکنش به غلظت اکسیژن موجود در بسته بستگی دارد، در حالی که در واکنش کاتالیز شده به تشکیل کمپلکس فلز - آسکوربات (MHA) وابسته است.

حضور یون‌های فلزی واسطه مانند Fe^{+2} و Cu^+ فعالیت حذف‌کنندگی اکسیژن را تا حدود ۱۶/۴ درصد افزایش می‌دهد [۲۱]. pH فیلم‌ها نقش مهمی در جلوگیری از اکسیداسیون اولیه دارند، زیرا در سطوح مختلف pH، اشکال مختلف اسید اسکوربیک غالب است. در pH پایین، فرم کاملاً پروتونه شده (AH_2) پایدارتر است و در مقایسه با مونوآنیون آسکوربات که در pH بالاتر غالب است، پایدارتر است و حساسیت بسیار کمتری نسبت به اکسیژن دارد. جانجاراسکول و همکاران (۲۰۱۳) [۲۲]، از فیلم ایزوله پروتئین آب‌پنیر حاوی اسید اسکوربیک برای جلوگیری از اکسیداسیون لیپید در بادام زمینی بوده استفاده کردند. و هنگامی که روی مواد غذایی دارای pH بالا اعمال شوند، مونوآنیون‌های آسکوربات تشکیل می‌شوند و مکانیسم حذف را تحریک می‌کنند.

۲-۶- سیستم‌های مهار مبنی بر آنزیم

رایج‌ترین آنزیم‌های مورد استفاده برای مهار اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی، گلوکز اکسیداز (GOx) همراه با کاتالاز است. عمل حذف با مکانیسم زیر انجام می‌گیرد که در آن گلوکز باید در غذا

انجام گرفته توسط تار و کلینگلر (۲۰۰۵) [۳۱]، نشان داده شد که استفاده از این جاذب‌ها، باعث مرگ‌ومیر ۱۰۰ درصدی در سوسک آرد قرمز خواهد شد. از سویی دیگر این جاذب‌ها در مواد غذایی با رطوبت کمتر از مواد لبنی و گوشتی نیز تأثیرات مثبتی از خود نشان داده‌اند در این مورد می‌توان به مطالعه تار و کلینگلر (۲۰۰۵)، اشاره نمود آن‌ها نشان دادند که در بسته‌های ۵۰۰ گرمی کشمش سلطانی بسته‌بندی شده در پلیمر پلی‌استر متالیز شده در دماهای ۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد، برای زمان‌های ۲۰، ۴۵ و ۹۰ روز، رنگ میوه با استفاده از جاذب اکسیژن و دمای پایین نگهداری (۱۵ درجه سانتی‌گراد) حفظ خواهد شد. مرور مطالعات صورت گرفته شده در مواد غذایی متنوع از جمله مطالعات مرتبط با نگهداری میوه و سبزیجات نشان می‌دهند که، جاذب‌های اکسیژن مانع از رشد ارگانیسم‌های ماکروسکوپی می‌شوند و همچنین وضعیت تغذیه‌ای ماده غذایی مانند سطوح ویتامین‌ها و دیگر ریزمغذی‌ها را حفظ می‌کنند، در نتیجه می‌توان از جاذب‌های اکسیژن در جهت افزایش ماندگاری میوه و سبزیجات استفاده کرد [۳۲].

۳-۳- آجیل

تحقیقات انجام شده توسط تاکنگا و همکاران (۱۹۸۷)، نشان می‌دهد که استفاده از جاذب‌های اکسیژن در دانه‌های سویا بوداده و آسیاب شده برای جلوگیری از اکسیداسیون لیپیدها اثرات مثبتی دارد و باعث بهبود ذخیره‌سازی و کیفیت گردو در دمای ۱۱ درجه سانتی‌گراد در مدت ۱۳ ماه خواهد شد این عمل باعث کاهش تشکیل هگزانال و کاهش ترش مزه‌گی می‌شود [۳۳]. از سویی دیگر طبق مطالعات انجام گرفته توسط جنسن و همکاران (۲۰۰۳)، نشان داده شد که بسته‌های حاوی جاذب‌های اکسیژن در مقایسه با بسته‌های حاوی فیلم با نفوذپذیری بسیار کم اکسیژن (لایه‌ی EVOH (اتیلن وینیل الکل))، ماندگاری هسته‌های بادام را افزایش می‌دهد و همچنین جاذب‌های اکسیژن می‌توانند تشکیل محتوای هگزانال و تخریب رنگ را کاهش دهند. از طرفی تحقیقات مکسیس و کونتومیناس (۲۰۱۱) [۳۴]، نشان می‌دهد که زمانی که از بسته‌های حاوی جاذب‌های اکسیژن استفاده می‌شود در مقایسه با زمانی که از بسته‌بندی‌های غیرقابل نفوذ به اکسیژن استفاده می‌شود میزان اسیدهای چرب غیراشباع کاهش می‌یابد. این نشان‌دهنده این موضوع است که بسته‌های حاوی جاذب‌های اکسیژن روشی مناسب برای بسته‌بندی آجیل و خشکبار خواهد بود.

۳-۴- ماهی و محصولات دریایی

طبق مطالعات سوزوکی و همکاران (۱۹۸۵)، نشان داده شد که جاذب‌های اکسیژن در کاهش تخریب روغن سردین مفید هستند

اکسیداسیون لیپیدها (تولید هگزانال) و کاهش بوی بد اکسیداتیو شد [۲۷]. علاوه بر این، در غذاهای مرطوب تر (با فعالیت آبی بیشتر) مانند غلات، استفاده از جاذب‌های اکسیژن باعث کاهش ارگانیسم‌های مولد فساد مانند پنی‌سیلیوم کمون، پنی‌سیلیوم راکوفورتی شد. با این حال اسپرژیلوس فلاووس و اندومایسز فیبولیگر در سطوح اکسیژن ۰/۳ درصد باقی ماندند. بیشتر میکروارگانیسم‌هایی که در صورت وجود جاذب اکسیژن در بسته زنده می‌مانند باکتری‌های بی‌هوازی هستند. می‌توان از ترکیب اسانس‌ها و اولئورزین‌های چند گیاه با غلظت‌های متفاوت (۱ تا ۱۰۰ میکرولیتر) با جاذب‌های اکسیژن در هر پتری دیش استفاده نمود تا اثر بیشتری بر از بین بردن میکروارگانیسم‌ها داشته باشند. طبق تحقیقات انجام گرفته توسط نیلسن و ریوس (۲۰۰۰) [۲۸]، نشان داده شد که بیشترین فعالیت نشان داده شده، به وسیله اسانس‌های خردل، دارچین، سیر و میخک می‌باشد [۲۸]. علاوه بر این، طبق مطالعات لاتو و همکاران (۲۰۱۰) [۲۹]، نشان داده شد که استفاده از یک جاذب اکسیژن که می‌تواند الکل را منتشر کند، بسیار مؤثر بوده و جایگزین خوبی برای نگهدارنده‌های شیمیایی مانند پروپیونات کلسیم (E2۸۲) یا سوربات پتاسیم (E2۰۲) است. هنگامی که با اتانول ترکیب شد، جاذب اکسیژن، رشد مخمرها، کپک‌ها و باسیلوس سرئوس را به طور قابل توجهی کاهش داد و از پراکسیداسیون لیپیدها و بوی ترش به مدت ۳۰ روز جلوگیری کرد.

طبق مطالعات انجام گرفته توسط کروز و همکاران (۲۰۰۶) نشان داده شد که جاذب‌های اکسیژن می‌توانند رشد میکروارگانیسم‌ها را به میزان ۱ تا $\log 1/5$ (کپک‌ها، مخمرها و استافیلوکوکوس اورئوس) در لازانیا تازه ذخیره شده در دمای 2 ± 10 درجه سانتی‌گراد کاهش دهند، اما در میزان رشد کلی فرم‌ها تغییری ایجاد نخواهد شد؛ بنابراین، این چنین استنباط می‌شود که می‌توان از جاذب‌های اکسیژن برای نگهداری مواد غذایی غله‌ای بدون استفاده از نگهدارنده‌های شیمیایی و تنها با مهار رشد میکروارگانیسم‌ها استفاده نمود [۱۲].

۳-۲- میوه و سبزیجات

طبق تحقیقات انجام شده توسط چارلز و همکاران (۲۰۰۳) [۳۰]، نشان داده شد که استفاده از جاذب‌های اکسیژن در بسته‌بندی گوجه‌فرنگی، عمر مفید را افزایش می‌دهد. آن‌ها متغیرهایی مانند نرخ تنفس گیاهی، نرخ انتقال گاز بسته‌بندی‌ها و سینتیک جذب اکسیژن جاذب را در نظر گرفتند. علاوه بر این، استفاده از LDPE (پلی‌اتیلن با چگالی کم) حاوی جاذب اکسیژن مبتنی بر آهن، به دلیل جذب سریع اکسیژن از اکسیداسیون بتاکاروتن در تکه‌های سیب زمینی شیرین خشک شده جلوگیری می‌کند. طبق مطالعات

۳-۶-۲- پنیر

در تولید پنیر میکروارگانیزم‌ها نقش کلیدی دارند. کشت‌های آغازین برای تولید پنیر معمولاً مزوفیلیک هستند که از استارترهای سنتی تکثیرشده با لبنیات مشتق می‌شوند. با این حال، برخی از میکروارگانیزم‌ها در تولید پنیر مفید بوده و برخی دیگر مفید نیستند و می‌توانند باعث فساد پنیر شوند. به‌طور کلی، پنیرهای سفت که محتوای آب بالایی ندارند، مستعد حمله کپک هستند، درحالی‌که پنیرهای مرطوب می‌توانند تحت تأثیر باکتری قرار گیرند. همچنین چربی‌های موجود در برخی پنیرها مستعد اکسیداسیون اکسیژن در هوا هستند که می‌تواند منجر به تند شدگی پنیر شود. کنترل سطح اکسیژن در بسته‌های محصولات غذایی حساس به اکسیژن مانند پنیر برای حفظ کیفیت محصول و ماندگاری بیش‌ازحد تعیین شده ضروری است. اکسیژن به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم باعث فساد پنیر سخت می‌شود. بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده (MAP) با استفاده از مخلوط‌های گازی با کم کردن اکسیژن، می‌تواند عمر ماندگاری پنیر سخت را افزایش دهد و از اکسیداسیون و رشد میکروارگانیزم‌های عامل فاسد محافظت کند. پنیرهای سخت و نیمه سخت معمولاً با ۱۰۰ درصد دی‌اکسید کربن بسته‌بندی می‌شوند، درحالی‌که برای پنیرهای نرم این نسبت معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ درصد است. نتایج تحلیل‌های میکروبیولوژیکی و ارزیابی‌های حسی نمونه‌های پنیر ذخیره‌شده نشان می‌دهد که بسته‌بندی فعال تقریباً به‌اندازه بسته‌بندی تحت خلاء و بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده در افزایش ماندگاری پنیر رسیده، مؤثر است [۴۰]. با این حال، اگر شرایط بسته‌بندی، ذخیره‌سازی یا توزیع رعایت نشود، مزایای اصلاح اتمسفر بی‌اثر بوده و اکسیژن بر کیفیت پنیر تأثیر می‌گذارد. استفاده از جاذب‌های اکسیژن، تازگی محصولات پنیر را بدون استفاده از قارچ‌کش‌ها، باکتری‌کش‌ها یا سایر مواد ثابت‌کننده حفظ می‌کند [۴۱]. و از نظر تولیدی راه‌حل ساده‌تری نسبت به MAP دارد. با این حال، باید در نظر داشته باشیم که برخی از پنیرها باید تنفس کنند و نباید از جاذب‌ها برای پنیر شکوفه و پنیر آبی استفاده شود، چراکه می‌تواند منجر به بوتولیسم شود که در شرایط بی‌هوازی رخ می‌دهد. اخیراً به پوشش‌ها و فیلم‌های خوراکی اشاره‌شده است که علاوه بر خوراکی بودن، می‌توانند با کنترل سرعت تبادل اکسیژن و دی‌اکسید کربن و به‌عنوان حامل ترکیبات ضد میکروبی، برای کاهش وزن و جلوگیری از فساد میکروبی مورد استفاده قرار گیرند [۴۲]. با این حال، پوست منع اصلی رشد کپک‌های سطحی است. به نظر می‌رسد یک‌راه حل جالب، استفاده از کاغذ پنیر با پوششی حاوی یک جاذب اکسیژن باشد که باعث می‌شود عمر مفید پنیرهای فاسدشدنی را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد [۴۳].

و در طی یک دوره یک‌ماهه و دمای نگهداری ۲۲ درجه سانتی‌گراد، اسیدهای چرب غیراشباع امگا سه ماهی در طول نگهداری زمانی که با یک جاذب اکسیژن بسته‌بندی شده بودند، تجزیه نشدند [۳۵]. از سویی دیگر مطالعات مکسیس و همکاران (۲۰۰۹)، نشان داده شد که با استفاده از یک جاذب اکسیژن در ترکیب با اسانس پونه کوهی ماندگاری فیله‌های قزل‌آلای رنگین‌کمان ذخیره‌شده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، با جلوگیری از فساد غذا و سرکوب باکتری‌های بیماری‌زا، به ثبات غذایی محصولات ماهی کمک می‌کند و باعث کیفیت و قیمت بازار یک محصول ماهی بسته‌بندی شده، می‌شود [۳۶].

همچنین فاس و همکاران (۲۰۲۰) [۳۷]، خاطر نشان کردند که استفاده از جاذب‌های اکسیژن مبتنی بر پالادیوم دارای ظرفیت جذب اکسیژن بالایی هستند و می‌توانند کیفیت مواد غذایی را حفظ کنند و در صورت استفاده به صورت فیلم، پتانسیل جلوگیری از اکسیداسیون لیپید را در محصولات غذایی با محتوای بالای غیر اشباع، دارند که این نوع جاذب اکسیژن را می‌توان برای افزایش ماندگاری محصولات دریایی استفاده کرد.

۳-۵- محصولات گوشتی

بررسی‌ها حاکی از این است که جاذب‌های اکسیژن در گوشت بسته‌بندی شده و محصولات گوشتی فراوری شده نیز استفاده شده است [۳۸]. در تحقیقی مشخص شده که کاربرد مواد آنتی‌اکسیدانی طبیعی مانند کیتوزان ۱٪، با گوشت گاو و جاذب‌های اکسیژن باعث افزایش ماندگاری ۵ تا ۶ روز شده است [۳۹]. از سویی دیگر استفاده از عصاره مرکبات با غلظت ۰/۱ یا ۰/۲ میلی‌لیتر در ۱۰۰ گرم گوشت مرغ چرخ شده به همراه یک جاذب اکسیژن، ماندگاری را تا ۵ روز افزایش می‌دهد [۴۰].

۳-۶- محصولات لبنی

۳-۶-۱- کره

کره یک فرآورده لبنی است که به شدت در برابر اکسیداسیون لیپید حساس است، این پدیده منجر به ایجاد بوهای نامطلوب و در نتیجه تغییر خواص ارگانولپتیک و ارزش غذایی آن و در نتیجه کاهش ماندگاری آن می‌شود [۳۸]. کره به‌عنوان یکی از محصولاتی است که با استفاده از جاذب‌های اکسیژن در برابر تندشدگی محافظت می‌شود، دانشمندان اسپانیایی متوجه شدند که کاربرد جاذب اکسیژن، اثر بخشی و سودمندی را در کاهش سطح اکسیژن ظروف کره نشان داده است و می‌تواند گزینه خوبی برای محافظت از نمونه‌های کره در برابر اکسیداسیون باشد [۳۹].

۳-۶-۳- شیرخشک و غذای کودک بر پایه شیرخشک

اکسیداسیون لیپید و اکنشی است که از عوامل محدودکننده زمان نگهداری شیر خشک می‌باشد [۴۴]. تلاش‌هایی برای جلوگیری از این پدیده با استفاده از بسته‌بندی در گاز بی‌اثر یا خلأ گزارش شده است [۴۵]. پراکسیداسیون لیپیدی مسئول تغییرات در طعم و بوی شیر خشک است که در نتیجه‌ی محصولات واکنش ثانویه (آلکان‌ها، آلکن‌ها، آلدئیدها و کتون‌ها) ایجاد می‌شود. این ترکیبات بوی خارجی می‌دهد و باعث از بین رفتن مواد مغذی شیر خشک می‌شوند در نتیجه ماندگاری آن را محدود می‌کنند. اتو اکسیداسیون ناشی از اتصال اکسیژن به اسیدهای چرب غیراشباع مشکلی جدی برای لبنیات خشک به ویژه لبنیات پرچرب است [۴۶]. شیر خشک کامل حداکثر زمان نگهداری ۶ ماه در دمای اتاق دارد. با این حال، اگر محصول در قوطی‌های بسته‌بندی شده تحت فشار کاهش یافته یا گاز بی‌اثر مانند نیترژن بسته

بندی شود، عمر مفید را می‌توان تا ۱۲ ماه افزایش داد. استفاده از یک جاذب اکسیژن امکان افزایش این دوره را تا ۳ سال فراهم می‌کند [۴۷].

۳-۶-۴- شکلات

شکلات بسته‌بندی شده با یک جاذب اکسیژن عطر، طعم و کیفیت غذایی خود را به میزان قابل توجهی نسبت به سایر روش‌های بسته‌بندی حفظ می‌کند [۴۸].

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از بسته بندی فعال پیشرفت مهمی در حفظ و افزایش ماندگاری مواد غذایی بسته بندی شده می‌باشد. فناوری‌های نوین نه تنها روش‌های نگهداری مواد غذایی را بهبود بخشیده است، بلکه به زمینه‌هایی جدیدی در نگهداری مواد غذایی تبدیل شده است که قبلاً غیرعملی به نظر می‌رسید امروزه با افزایش آگاهی مردم نسبت به مضرات مصرف مواد نگهدارنده شیمیایی تمایلات جامعه به استفاده از مواد غذایی تازه بدون نگهدارنده روندی روبه‌افزایش داشته است. از سویی دیگر عرضه کنندگان مواد غذایی در بازار سنتی و مارکت‌های مختلف خواستار افزایش عمر ماندگاری ماده غذایی به صورت طبیعی می‌باشند. با توجه به هزینه اندک به کارگیری جاذب‌های اکسیژن در بسته بندی مواد غذایی می‌توان علاوه بر تأمین عمر ماندگاری بالاتر، موضوع امنیت غذایی مصرف کنندگان را نیز در فصول مختلف سال تحت پوشش قرار داد و در مواقع بحرانی، از جمله خشک سالی و زلزله و دیگر حوادث غیرقابل پیش‌بینی از این تکنولوژی نوین کمک گرفت. در نتیجه سیستم‌های جاذب اکسیژن بهبود یافته و فناوری

بسته‌بندی فعال به کاهش تلفات محصولات غذایی در سوپرمارکت‌ها و افزایش قابلیت بازیافت و حذف مواد غیر دوستدار محیط زیست کمک می‌کنند. از سویی امروزه هدررفت مواد غذایی یک مشکل جهانی بوده که راهکار کامل و بی نقصی در این زمینه وجود ندارد و هر کدام از روش‌های موجود طرفداران و منتقدان مختص خودش را دارد؛ اما مطالعات اخیر در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی نشان می‌دهند که استفاده از جاذب‌های اکسیژن نه تنها می‌تواند باعث جلوگیری از تأثیرات مخرب اکسیژن و افزایش عمر ماندگاری شوند؛ بلکه عامل تأثیرگذاری در کاهش ضایعات مواد غذایی خواهند بود. از سویی پژوهش‌های اخیر در این حوزه گویای این مسئله هستند که جاذب‌های اکسیژن با مکانیسم‌های مختلف حذف کنندگی اکسیژن می‌توانند در طیف وسیعی از محصولات غذایی، از جمله محصولات غله‌ای، میوه و سبزیجات، محصولات گوشتی و دریایی و خشکبار و آجیل‌ها و فراورده‌های لبنی مورد استفاده قرار بگیرند. در این پژوهش مروری به سیر تحولات و پیشرفت‌های انجام گرفته در حوزه تولید، فرمولاسیون، کاربرد و مکانیسم جاذب‌های اکسیژن پرداخته شد و می‌توانیم از این جاذب‌های اکسیژن برای محافظت از محصول نهایی در برابر عوامل بیرونی و جایگزینی مناسب به جای نگهدارنده‌های ناسالم مانند سوربات، بنزوات، BHT، BHA، دی‌اکسیدسولفور استفاده کنیم؛ لذا تولیدکنندگان جاذب‌های اکسیژن در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران می‌توانند در اجرای استراتژی‌های تولید بیشتر و در دسترس قرار دادن این محصولات در صنایع غذایی، تلاش روزافزون انجام دهند.

۵- مراجع

- [1] D. Y. Y. Zahedi and N. Sedaqhat, "use of oxygen absorbers in food packaging", 20th National Congress of Food Sciences and Industries of Iran, 2011. (In Persian)
- [2] A. Dey and S. Neogi, "Oxygen scavengers for food packaging applications: a review," J. Trends Food Sci. Technol., vol. 90, pp. 26-34, 2019.
- [3] S. A. Dadfar, I. Alemzadeh, S. M. R. Dadfar, and M. Vosoughi, "Studies on the oxygen barrier and mechanical properties of low density polyethylene/organoclay nanocomposite films in the presence of ethylene vinyl acetate copolymer as a new type of compatibilize," J. Mater. Des, vol. 32, pp. 1806-1813, 2011.
- [4] F. Khalifa Zadeh, I. Shahabi Qahfarkhi, "Investigating the characteristics of various types of oxygen absorbers in active food packaging", J. Packaging Sciences and Techniques, vol. 9, no. 33, pp. 6-15, 2018. (In Persian)
- [5] L. Vermeiren, F. Devlieghere, M. Van Beest, N. de Kruif, and J. Debever, "Developments in the

- Synchrotron X-Rays and Neutrons", *J. Adv. Eng. Mater.*, vol. 13, no. 8, pp. 712-729, 2011 .
- [19] P. Scarfato, E. Avallone, M. R. Galdi, L. D. Maio, and L. Incarnato, "Preparation, characterization, and oxygen scavenging capacity of biodegradable α -tocopherol/PLA microparticles for active food packaging applications", *J. Polym. Compos.*, vol. 5, pp. 981-986, 2017 .
- [20] Z. Kordjazi and A. Ajji, "Development of TiO2 catalyzed HTPB based oxygen scavenging films for food packaging applications", *J. Food Control*, vol. 121, p. 107639, 2021.
- [21] S. Uluata, D. J. McClements, and E. A. Decker, "How the multiple antioxidant properties of ascorbic acid affect lipid oxidation in oil-in-water emulsions", *J. Agric. Food Chem.*, vol. 6, pp. 1819-1824, 2015.
- [22] T. Janjarasskul, S. C. Min, and J. M. Krochta, "Triggering mechanisms for oxygen-scavenging function of ascorbic acid-incorporated whey protein isolate films", *J. Sci. Food Agric.*, vol. 93, no. 12, pp. 2939-2944, 2013.
- [23] R. S. Cruz, G. P. Camilloto, and A. C. Dos Santos Pires, "Oxygen scavengers: An approach on food preservation", *J. Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 2, pp. 21-42, 2012.
- [24] S. Winestrand, K. Johansson, L. Järnström, and L. J. Jönsson, "Co-immobilization of oxalate oxidase and catalase in films for scavenging of oxygen or oxalic acid", *J. Biochem. Eng. J.*, vol. 72, pp. 96-101, 2013.
- [25] R. Chatterjee, K. Johansson, L. Järnström, and L. J. Jönsson, "Evaluation of the potential of fungal and plant laccases for active-packaging applications", *J. Agric. Food Chem.*, vol. 59, pp. 5390-5395, 2011.
- [26] T. Anthierens, P. Ragaert, S. Verbrugghe, A. Ouchchen, B. G. DeGeest, B. Nosedá, J. Mertens, L. Beladjal, D. D. Cuyper, W. Dierickx, F. D. Prez, and F. Devlieghere, "Use of endospore-forming bacteria as an active oxygen scavenger in plastic packaging materials", *J. Innov Food Sci Emerg Technol*, vol. 12, pp. 594-599, 2011.
- [27] S. Berenzon and I. S. Saguy, "Oxygen absorbers for extension of crackers shelf-life", *J. LWT- Food Sci. Technol.*, vol. 31, pp. 1-5, 1998.
- [28] P.V. Nielsen and R. Rios, "Inhibition of fungal growth on bread by volatile components from spices and herbs, and the possible application in active packaging, with special emphasis on mustard essential oil", *J. Food Microbiol.*, vol. 60, pp. 219-229, 2000.
- [29] E. Latou, S. F. Mexis, A. V. Badeka, and M. G. Kontominas, "Shelf life extension of sliced wheat bread using either an ethanol emitter or an ethanol emitter combined with an oxygen absorber as alternatives to chemical active packaging of foods", *J. Food Sci. Technol.*, vol. 10, pp. 77-86, 1999.
- [6] S. Yildirim, B. Röcker, M. K. Pettersen, J. Nilsen-Nygaard, Z. Ayhan, R. Rutkaite, T. Radusin, P. Suminska, B. Marcos, and V. Coma, "Active packaging applications for food", *J. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 17, no. 1, pp. 165-199, 2018.
- [7] G. L. Robertson, "Food Packaging: principles and practice," Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 2005.
- [8] Z. Foltynowicz, A. Bardenshtein, S. Sänglerlaub, H. Antvorskov, and W. Kozak, "Nanoscale, zero valent iron particles for application as oxygen scavenger in food packaging", *J. Food Packag. Shelf Life*, vol. 11, pp. 74-83, 2017.
- [9] S. A. Cichello, "Oxygen absorbers in food preservation: A review," *J. Food Sci. Technol.*, vol.52, pp.1889-1895, 2015.
- [10] M. Qian, D. Liu, X. Zhang, Z. Yin, B.B. Ismail, X. Ye, "A review of active packaging in bakery products: Applications and future trends", *J. Trends Food Sci. Technol.*, vol. 114, pp. 459-471, 2021.
- [11] J. S. Lee, Y. Chang, E. S. Lee, H. G. Song, P. S. Chang, and J. Han, "Ascorbic acid-based oxygen scavenger in active food packaging system for raw meatloaf", *J. Food Sci.*, vol. 83, pp. 682-688, 2018.
- [12] R. S. Cruz, N. D. F. F. Soares, and N. J. D. Andrade, "Evaluation of oxygen absorber on antimicrobial preservation of lasagna-type fresh pasta under vacuum packed", *J. Cienc. Agrotecnologia*, vol. 30, pp. 1135-1138, 2006.
- [13] Z. Foltynowicz, "Nanoiron-based composite oxygen scavengers for food packaging", *Zenon foltynowicz, Compos. Mater. Food Packag.*, vol. 1, pp. 209-234, 2018.
- [14] J. Yu, R. Y. F. Liu, B. Poon, S. Nazarenko, T. Koloski, A. Hiltner, and E. Baer, "Polymers with palladium nanoparticles as active membrane materials", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 92, no. 2, pp. 749-756, 2004 .
- [15] S. Hutter, N. Rüegg, and S. Yildirim, "Use of palladium based oxygen scavenger to prevent discoloration of ham", *J. Food Packag. Shelf Life*, vol. 8, pp. 56-62, 2016.
- [16] R. Hamilton, C. Kalu, E. Prisk, F. B. Padley, and H. Pierce, "Chemistry of free radicals in lipids", *J. Food Chem.*, vol. 2, pp. 193-199, 1997.
- [17] B. De Mayo, "The everyday physics of hearing and vision", Morgan & Claypool Publishers, 2015.
- [18] I. Manke, H. Markötter, C. Tötze, N. Kardjilov, R. Grothausmann, M. Dawson, and J. Banhart, "Investigation of Energy-Relevant Materials with

- [39] P. Otero-Pazos, R. Sendon, I. Martinez, G. P. Aurrekoetxea, I. Anguio, and A.R.B.D. Quiros, "Evaluation of oxygen absorber system effectiveness in butter containers", *J. Cyta J Food*, vol. 16, pp. 205-212, 2018.
- [40] H. Panfil-Kuncewicz, A. Lis, and M. Majewska, "The use of oxygen absorbers for packaging ripened cheese", *J. Pol. J. Nat. Sci.*, vol. 30, pp. 285-295, 2015 .
- [41] M. Ash and I. Ash, "Handbook of preservatives. Synapse Information Resources," Inc., Endicott, NY, 2004.
- [42] M. J. Costa, L. C. Maciel, J. A. Teixeira, A. A. Vicente, and M. A. Cerqueira , "Use of edible films and coatings in cheese preservation: Opportunities and challenges", *J. Food Res. Int.*, vol. 107, pp. 84-92, 2018 .
- [43] M. Ligaj, M. Tichoniuk, R. Cierpiszewski, and Z. Foltynowicz, "Efficiency of novel antimicrobial coating based on iron nanoparticles for dairy products packaging", *J. Coat*, vol. 10, pp. 156, 2020.
- [44] M. Hu and C. Jacobsen, "Oxidative stability and shelf life of foods containing oils and fats", *DuPont Nutrition and Health*, New Century, KS, USA, 2016.
- [45] M. A. Lloyd, J. Zou, H. Farnsworth, L. V. Ogden, and O. A. Pike, "Quality at time of purchase of dried milk products commercially packaged in reduced oxygen atmosphere", *J. Dairy Sci.*, vol. 87, pp. 2337-2343, 2004 .
- [46] Z. Foltynowicz and A. Rikhie, "Oxygen scavengers applications in the dairy industry", *J. Dairy Sci. Technol.*, vol. 3, pp. 16-25, 2020.
- [47] D. S. An, H. J. Wang, C. Jaisan, J. H. Lee, and M. G. Jo, "Effects of modified atmosphere packaging conditions on quality preservation of powdered infant formula", *J. Packag. Technol. Sci.*, vol. 31, pp. 441-446, 2018.
- [48] S. F. Mexis, A.V. Badeka, K. A. Riganakos, and M. G. Kontominas, "Effect of active and modified atmosphere packaging on quality retention of dark chocolate with hazelnuts", *J. Innov Food Sci Emerg Technol*, vol. 11, pp. 177-186, 2010.
- preservatives", *J. Cereal Sci.*, vol. 52, pp. 457-465, 2010 .
- [30] F. Charles, J. Sanchez, and N. Gontard, "Active modified atmosphere packaging of fresh fruits and vegetables: modeling with tomatoes and oxygen absorber", *J. Food Sci.*, vol. 68, no. 5, pp. 1736-1742, 2003.
- [31] C. Tarr and P. Clingeffer, "Use of an oxygen absorber for disinfestation of consumer packages of dried vine fruit and its effect on fruit colour", *J. Stored Prod. Res.*, vol. 41, pp. 77-89, 2005.
- [32] J. Alves, P. D. Gaspar, T. M. Lima, and P. D. Silva, "What is the role of active packaging in the future of food sustainability? A systematic review", *J. Sci. Food Agric.*, vol. 103, no. 3, pp. 1004-1020, 2023.
- [33] F. Takenaga, S. Itoh, and H. tsuyuki, "Prevention of lipid oxidation in roasted and ground soybean with oxygen absorber during storage", *J. NSKGA*, vol. 34, pp. 705-713, 1987.
- [34] S. Mexis and M. Kontominas, "Effect of oxygen absorber, nitrogen flushing, packaging material oxygen transmission rate and storage conditions on quality retention of raw whole unpeeled almond kernels (*Prunus dulcis*)", *J. LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 43, pp. 1-11, 2010 .
- [35] H. Suzuki, S. Wada, S. Hayakawa, and S. Tamura, "Effects of oxygen absorber and temperature on ω 3 polyunsaturated fatty acids of sardine oil during storage", *J. Food Sci.*, vol. 50, no. 2, pp. 358-360, 1985.
- [36] S. Mexis, E. Chouliara, and M. Kontominas, "Combined effect of an oxygen absorber and oregano essential oil on shelf life extension of rainbow trout fillets stored at 4 C", *J. Food Microbiol.*, vol. 26, no. 6, pp. 598-605, 2009 .
- [37] N. Faas, B. Röcker, S. Smrke, C. Yeretziyan, and S. Yildirim, "Prevention of lipid oxidation in linseed oil using a palladium-based oxygen scavenging film", *J. Food Packag. Shelf Life*, vol. 24, p. 100488, 2020.
- [38] B. Barriuso, I. Astiasarán, and D. Ansorena, "A review of analytical methods measuring lipid oxidation status in foods: a challenging task", *J. Eur. Food Res. Technol.*, vol. 236, pp. 1-15, 2013.