Scientific Journal of Packaging Science and Art
Vol. 14, No. 1, Spring 2023, Serial No. 53
ISSN: 2228-6675 , E-ISSN: 2980-7824

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, Revised: 24/04/2023, Accepted: 20/05/2023, Published: 22/05/2023)

DOR: 20.1001.1.22286675.1397.9.33.7.6

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

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University © Authors

*Corresponding Author Email: sedaghat@um.ac.ir

نشریه علمی «علوم و فنون بسته‌بندی»
سال چهاردهم، شماره ۵۳، بهار ۱۴۰۲؛ ص ۶۱-۵۳
دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۱۳۶۵
شاپای چاپی: ۲۲۲۸-۶۶۷۵| شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۷۸۲۴
علمی – ترویجی

کاربرد و مکانیسم اثر جاذب‌های اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی

ناصر صداقت[1*]، محمدکاظم حیدریان[2]، علیرضا حیدریان[3]
۱- استاد ۲و۳- دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع غذایی گرایش فناوری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد ، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1397.9.33.7.6
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

چکیده

اکسیژن می‌تواند باعث افت کیفیت و کاهش ماندگاری در بعضی از مواد غذایی شود دلیل وجود اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی عمدتاً به‌خاطر بقایای اکسیژن موجود در غذا، بقایای اکسیژن موجود در فضای سربسته، مواد اولیه و آسیب به ظروف در فرایند بسته‌بندی است. اساساً اکسیژن می‌تواند از راه‌های مختلفی باعث فساد ماده غذایی شود ازجمله فساد اکسیداتیو که منجر به کاهش کیفیت در چربی‌ها و بخش‌های چرب ماده غذایی، اکسیداسیون لیپیدها، تغییر ساختار پروتئین‌ها، ویتامین‌ها و رنگ‌دانه‌ها و فراهم‌کردن شرایط مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها و قهوه‌ای شدن آنزیمی شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که می‌توان برای کاهش میزان این عامل اکسیداتیو از روش‌های متنوعی ازجمله 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. باتوجه‌به 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

اکسیژنی که در بسته‌بندی مواد غذایی باقی می‌ماند می‌تواند تأثیرات مخربی روی کیفیت و عمر ماندگاری فراورده نهایی باقی بگذارد. از طرف دیگر نیز اکسیژن می تواند بعد از بسته‌بندی از لفاف بسته‌بندی وارد فضای بالا آن شود. البته همیشه نبود اکسیژن دربسته نامطلوب نخواهد بود، بلکه در بعضی موارد مانند میوه‌ها و سبزیجات عدم حضور اکسیژن باعث تخمیر و درنهایت ایجاد ترشیدگی در محصول نهایی می شود یا دربسته بندی گوشت تازه نیز نبود اکسیژن دربسته باعث تبدیل رنگ دانه قرمز میوگلوبین به مت میوگلوبین قهوه ای 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 گذاشته‌شده است که درنهایت به کیفیت بالا ماده غذایی می پردازد و باعث کاهش مشکلات زیست‌محیطی 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

سیستم‌هایی مانند جاذب های 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 بسته بندی مواد غذایی هستند که این جاذب‌ها بر اساس مکانیسم های مختلف با اکسیژن وارد واکنش شده و با بیرون راندن آن باعث حفظ تمام خصوصیات مواد غذایی از جمله: عطر، طعم، رنگ و ارزش تغذیه ای می شوند 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 بستهٔ غذایی واکنش می‌دهد و تأثیرات نامطلوبی ایجاد می کند که نهایتاً کاهش عمر انباری و افت کیفیت حاصل آن خواهد بود. باتوجه به مطالب ذکرشده کنترل حضور یا عدم حضور اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی مختلف، امری مهم و ضروری تلقی می‌شود

کـه ایـن موضـوع بـه اهمیـت حضـور جـاذب‌هـای اکسـیژن در بسته‌بندی مواد غذایی اشاره دارد[۵].

۱-۱- جاذب اکسیژن

اصطلاح جاذب اکسیژن برای موادی به کار می رود کـه در داخـل بسته قرار داده شده و از طریق واکنش های شیمیایی یا آنزیمی بـا اکسیژن وارد واکنش شـده و غلظـت اکسـیژن درون بسـته را بـه کمتـر از ۰/۰۱ درصـد مـی‌رسـانند و مـی‌تواننـد شـروع‌کننـده‌ی واکنش های اکسیداسیون بوده و یا سرعت بخش ایـن واکـنش‌هـا باشد، از طرفی جاذب های اکسیژن این توانایی را دارند کـه طبـق پدیده انتشار و به‌وسیله ی ایجاد اخـتلاف فشـار جزئـی، اکسـیژن موجود در بافت ماده غذایی را به فضای داخل بسته بندی منتقـل کرده و درنهایت آن را حذف کنند. این جاذب ها با سرعت عملـی که دارند می توانند حجم زیادی از اکسـیژن را از بـین ببرنـد[۳]. نقش جاذب های اکسیژن از آنجایی پررنگ می شود که روش هایی مانند پر کردن تخت خلأ، بسته‌بندی با اتمسفر اصـلاح‌شـده ، پـر کردن داغ، تزریق گاز خنثی و دیگر روش های مرسوم نمی تواننـد به طور کامل اکسیژن موجود دربسته را حذف کنند و معمولاً ۰/۱ تا ۲ درصد از این عامل اکسیدکننده در بسته بندی بـاقی خواهـد ماند. از سوی دیگر حتی بسته‌بندی های غیر قابل‌نفوذ به اکسیژن نیز نمی توانند به‌طور کامل از ورود اکسیژن به محیط بسته‌بنـدی جلوگیری نمایند. درنتیجه استفاده از این جاذب ها روشی تکمیلی دربسـته بنـدی اتمسـفر بهبودیافتـه و بسـته بنـدی تحـت خـلا می‌باشد[۶].

۱-۲- تاریخچه

محققان در سال ۱۹۲۰ مـیلادی بـه وسـیله ی مخلـوطی از مـواد جاذب رطوبه سولفات آهن، پودر مس، کلریـد آمونیـوم توانسـتند اکسیژن را حذف کنند. همچنین در اوایل دهه‌ی ۴۰ میلادی قرن بیسـتم نـوعی مـواد جـذب‌کننـده‌ی اکسـیژن تولیـد شـد کـه دربسته های مواد غذایی خشک مـورد اسـتفاده قـرار مـی گرفـت، همچنـین طبـق تحقیقـات انجـام‌شـده نشـان داده شـد کـه در پلاستیک‌های چندلایه‌ای مانند کیسه‌های انعطاف‌پذیر می‌توان از این سیستم استفاده کرد و گاز هیدروژن را به همـراه پـالادیم در بین لایه ها قرارداد. در سـال ۱۹۶۰ مـیلادی بـازار ژاپـن میزبـان جاذب های اکسیژن هیپوسولفیدسـدیم و هیدروسـولفید شـد امـا جاذب های نام‌برده در طی حمـل‌ونقـل پایـداری مـورد انتظـار را نداشتند و واکنش های جانبی نـامطلوبی را ایجـاد مـی کردنـد. در سال ۱۹۷۰ میلادی برای اولین بار جاذب هـای اکسـیژن تجـاری توسط شرکت میتسوبیشی ژاپن وارد بازار شـد و از سـوی دیگـر محققین استرالیا در سـال ۱۹۸۰ مـیلادی سیسـتمی بـر مبنـای واکنش با اکسیژن یگانه ساختند که نوعی فیلم پلیمری بـود کـه هم می توانست اکسیژن را در خود حل کند و هـم بـرای واکـنش برای اکسیژن نوعی محیط تلقی می‌شد یک شرکت ژاپنی در سال ۱۹۹۰ میلادی جاذب اکسیژن حاوی آهن احیا را به کمـک روش کو اکستروژن بین دولایه‌ی مواد بسته‌بنـدی قـرا داد کـه در ایـن روش لایه ی نفوذناپذیر به اکسیژن لایه ی بیرونی بود و نفوذپـذیر به اکسیژن لایه داخلی بود. در ادامه ی روند تکـاملی جـاذب‌هـای اکسیژن شرکت ژاپنی دیگـری کیسـه هـای حـاوی مـواد جـاذب اکسیژن را بین دولایه‌ی ماده‌ی بسته‌بندی قرار داد در ایـن روش هوای داخل بسته از خلل و فرج موجـود در روی لایـه ی داخلـی عبـور مـی‌کـرد و بـا جـاذب اکسـیژن وارد واکـنش مـی‌شـد[۷]. همچنین استفاده از هیـدروکربن‌هـای غیراشـباع نـوع دیگـری از تکنولوژی جاذب‌های اکسیژن در فیلم‌های پلاستیکی بود شـرکت مولتی سرب در سال ۱۹۹۱ میلادی بسته هایی تولیـد کـرد کـه کیسه‌های حاوی جاذب‌های اکسیژن که به‌صـورت برچسـب روی دیواره ی داخلی آن ها چسبانده شده بوده را تولید کرد[۱]. امروزه این جاذب‌های اکسیژن در مقیاس نانو می‌توانند مورداستفاده قرار گیرنـد. در مطالعـه انجـام‌شـده توسـط فولتینـوویچ و همکـاران (۲۰۱۷)[۸]، نشان داده شد که ظرفیت جذب اکسـیژن آهـن در مقیاس نانو در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد و در شرایط خشـک ده برابر بیشتر از نمونه ی تجاری موجود بر پایه آهن در یک ماتریس پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن در مقیاس غیر نانو بود. مطالعه انجام‌شده توسط سیچلو و همکاران (۲۰۱۵)[۹]، نشان می دهد که در حـال حاضر مؤثرترین و پرمصرف‌ترین جاذب‌های اکسیژن، ساشـه‌هـای جاذب‌های اکسیژن حاوی پودر آهن هستند. بااین‌حال، این نوع از جاذب هـا دارای چنـدین معایـب از جملـه ناسـازگاری بـا امـواج مایکروویو، فلزیاب های مواد غذایی، و آشکارسازهای مواد خارجی اشعه ایکس هستند. علاوه بر این، کیسه‌های حـاوی جـاذب‌هـای اکسیژن در تماس با مواد غذایی با رطوبـت بـالا ماننـد میـوه هـا، سبزیجات، ماهی، گوشت و محصولات مرتبط مـی تواننـد اکسـید آهن تولید کنند و مقبولیت ماده غـذایی مصـرفی را بکاهنـد کـه این مشکل را می توان با قراردادن این جاذب‌ها در مواد پلیمری و یا استفاده به شـکل برچسـب بـر روی بسـته مـاده غـذایی، حـل نمود[۱۰].

در مطالعـه انجـام‌شـده توسـط جونگسـو لـی و همکـاران (۲۰۱۸)[۱۱]، یک جاذب اکسیژن غیر آهنی(NFOS) بـا ترکیـب جدید توسعه داده شد که فعالیت مهار اکسیژن بهتـری را نسـبت به نمونه های تجاری نشان داد که نه تنها اکسیداسیون لیپیـدها را مهار کرد، بلکه رشد میکروبـی را در نـان و گوشـت کـاهش داد و همچنین می توان از آن به‌عنوان یک جاذب اکسیژن مناسب برای محافظت از محصـولات گوشـتی در برابـر اکسیداسـیون لیپیـد و آلودگی میکروبی استفاده کرد.

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:

۲-۱- اکسیداسیون پودر آهن

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

$$Fe \longrightarrow Fe^{+2} + 2e^-$$

$$\mathbf{1/2}\, O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2OH^-$$

$$Fe^{+2} + 2OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2$$

$$Fe(OH)_2 + \mathbf{1/4}\, O_2 + \mathbf{1/2}\, H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3$$

طبق مطالعات انجام گرفته توسط کروز (۲۰۰۶)[۱۲]، نشان داده شد که استفاده از بسته های کوچک حاوی پودر اکسید آهن به‌عنوان جاذب اکسیژن همراه با فناوری خلأ برای نگهداری لازانیا موجب کندی رشد میکروارگانیسم هایی مانند مخمر، کپک ها یا کلی‌فرم‌ها شده و این رشد و تا ۳۰ روز به حداکثر حد مجاز نرسیده ازآنجا می توان توجیه کرد که آهن می تواند به‌عنوان یک جاذب مؤثر اکسیژن مورداستفاده قرار گیرد. بکویث و همکاران (۲۰۰۹)، به این موضوع اشاره کردند که پودر آهن همچنین می تواند 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، بی‌اثربودن 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 می توان 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 به‌طورکلی در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می شوند[۱۴]. بنابراین، در حضور یک اتمسفر اصلاح‌شده حاوی هیدروژن، آن‌ها می‌توانند به‌عنوان یک جاذب اکسیژن برای بسته بندی مواد غذایی عمل کنند[۱۵]. افزودن کلر با کاتالیزور پالادیوم، توزیع کاتالیزور را افزایش می دهد که منجر به راندمان بالاتر می‌شود. همچنین سدیم و آهن به‌عنوان محرک در واکنش کاتالیزور عمل می کنند. این فناوری برای بسته‌بندی مواد غذایی مانند ژامبون، ویتامینC، نوشیدنی‌های نظیر چای و آب‌میوه‌ها به کار گرفته‌شده 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 مورداستفاده برای حذف اکسیژن داخل بسته پلی‌بوتا دی ان به همراه نئودکانوات کبالت به‌عنوان کاتالیزور است. مکانیسم واکنش به‌صورت زیر است:

$$O_2 + RH \longrightarrow ROOH$$

$$Co^{+2} + ROOH \longrightarrow Co^{+3} + OH^- + RO$$

$$Co^{+3} + ROOH \longrightarrow Co^{+2} + OH^- + RO$$

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 پلی آمیدها و پلی‌اتیلن‌ترفتالات 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 نمی آید. از سویی دیگر تحقیقات دی مایو و همکاران (۲۰۱۵) به این موضوع اشاره کرد که عدم تغییر رنگ سیب های 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 بسته بندی مواد غذایی است؛ چراکه حذف‌کننده طبیعی رادیکال های آزاد می باشد[۱۶]. آلفا- توکوفرول به‌طورکلی با یک کاتالیزور ترکیب می شود که به‌دلیل افزایش فعالیت پاک سازی، حذف اکسیژن درون بسته را افزایش می دهد. 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، داربی، کوکسی، داوسون و وایتساید (۲۰۱۱)[۱۸]، پیشنهادشده است و به شرح واکنش‌های زیر می‌باشد .

$$O_2 + Fe(II) \longrightarrow O_2^{O} + Fe(III)$$

$O_2^O + TocH \longrightarrow Toc^O + H2O^O$

$H2O^O + TocH \longrightarrow H_2O_2 + Toc^O$

$2Toc^O \longrightarrow$ dimer and other products

$Fe(II) + H_2O_2 \longrightarrow Fe(III) + HO^O + OH^-$

$O2^O + HO^O \longrightarrow O_2^* + OH^-$

$O_2^* + TocH \longrightarrow$ Tocopherylguinine

$Fe(III) + H_2O_2 \longrightarrow Fe(II) + O_2^O + H^+$

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 مبتنی 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 می یابد. در مورد اکسیداسیون کاتالیز نشده، سرعت واکنش به غلظت اکسیژن موجود دربسته بستگی دارد، درحالی‌که 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 (AH2) 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 بوداده 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 مبتنی بر آنزیم

رایج‌ترین آنزیم‌های مورداستفاده 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 یا در فرمول وجود داشته باشد و کاتالاز اضافه‌شده H_2O_2 تشکیل‌شده در طی واکنش را تجزیه می‌کند[۲۳].

$$2glucose + 2O_2 + H_2O \xrightarrow{GOX} D\text{-}glocose\text{-}2gluconlc\ acid + 2H_2O_2$$

$$2H_2O_2 \xrightarrow{Cat} 2H_2O + O_2$$

از سویی دیگر طبق تحقیقات انجام گرفته توسط وینسترند و همکاران (۲۰۱۳)[۲۴]، اگزالات اکسیداز (OO_x) همراه با کاتالاز به‌عنوان یک ماده بسته‌بندی مؤثر استفاده‌شده است، زیرا توانایی حذف اکسیژن و تولید دی‌اکسید کربن را دارا می باشد که درنهایت 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 به‌عنوان جاذب اکسیژن استفاده‌شده است که در آن لاکازها اکسی ردوکتازهای حاوی مس هستند که از گیاهان و قارچ‌هایی مانند ترامتس ورسیکالر مایسلیوپتورا ترموفیلا راس ورنیسیفرا به دست می آیند[۲۵]. این نوع سیستم مهار اکسیژن برای مواد غذایی با رطوبت بالا به‌شدت توصیه می‌شود زیرا فعالیت آنزیم‌ها به رطوبت نسبی بالا بستگی دارد.

۲-۷- سیستم‌های مهار مبتنی بر میکروارگانیسم‌ها

مهار اکسیژن بر اساس میکروارگانیسم های 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 به‌عنوان یک جاذب اکسیژن درجه غذایی استفاده‌شده است[۲۳]. مخمر هنگامی‌که با مواد مختلف مانند آب یا اسید اسکوربیک مرطوب می‌شود، فعال می‌شود که به نوبه خود اکسیژن را برای تنفس مصرف می‌کند[۲۵].

سایر میکروارگانیسم‌های هوازی مانند باسیلوس آمیلولیکوفاسینس ، کوکوریا واریانس و پیشیا سوبپلیسیلوسا نیز برای اهداف مهار اکسیژن استفاده‌شده‌اند[۲۶].

۳- کاربرد جاذب ها اکسیژن در مواد غذایی مختلف

۳-۱- محصولات نان و بیسکویت

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

اکسیداسیون لیپیدها (تولید هگزانال) و کاهش بوی بد اکسیداتیو شد[۲۷]. علاوه‌بر این، در غذاهای مرطوب تر (با فعالیت آبی بیشتر) مانند غلات، استفاده از جاذب‌های اکسیژن باعث کاهش ارگانیسم های مولد فساد مانند پنی‌سیلیوم کمون ، پنی‌سیلیوم راکوفورتی شد. بااین حال آسپرژیلوس فلاووس و اندومایسز فیبولیگر در سطوح اکسیژن ۰/۰۳ درصد باقی ماندند. بیشتر میکروارگانیسم هایی که در صورت وجود جاذب اکسیژن دربسته 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 میکروارگانیسم ها داشته باشند. طبق تحقیقات انجام‌گرفته توسط نیلسن و ریوس (۲۰۰۰)[۲۸]، نشان داده شد که بیشترین فعالیت نشان داده‌شده، به‌وسیله اسانس‌های خردل، دارچین، سیر و میخک می‌باشد[۲۸]. علاوه‌بر 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 نگهدارنده های شیمیایی مانند پروپیونات کلسیم (E۲۸۲) یا سوربات پتاسیم (E۲۰۲) است. هنگامی که با اتانول ترکیب شد، جاذب اکسیژن، رشد مخمرها، کپک‌ها و باسیلوس سرئوس را به‌طور 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 ۱/۵ log (کپک ها، مخمرها و استافیلوکوکوس اورئوس) در لازانیا تازه ذخیره‌شده در دمای ۲±۱۰ 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 جاذب های اکسیژن در بسته بندی 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. علاوه‌بر 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 انجام گرفته توسط تار و کلینگلفر (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 وکلینگلیفر(۲۰۰۵)، اشاره نمود آن‌ها نشان دادند که در بسته‌های ۵۰۰ گرمی کشمش سلطانی بسته‌بندی‌شده در پلیمر پلی‌استر متالیز شده در دماهای ۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد، برای زمان‌های ۹، ۲۰ و ۴۵ روز، رنگ میوه با استفاده از جاذب اکسیژن و دمای پایین نگهداری (۱۵ درجه سانتی‌گراد) حفظ خواهد شد. مرور مطالعات صورت گرفته‌شده در مواد غذایی متنوع ازجمله 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 انجام‌شده توسط تاکناگا و همکاران (۱۹۸۷)، نشان می‌دهد که استفاده از جاذب‌های اکسیژن دردانه‌های 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 هسته های بادام را افزایش می‌دهد و همچنین جاذب های 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 بسته های حاوی جاذب های 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 ساردین مفید هستند

و در طی یک دوره یک‌ماهه و دمای نگهداری ۲۲ درجه سانتی گراد، اسیدهای چرب غیراشباع امگا سه ماهی در طول نگهداری زمانی که با یک جاذب اکسیژن بسته‌بندی‌شده 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 می دهد. علاوه بر این، با جلوگیری از فساد غذا و سرکوب باکتری های بیماری زا، به ثبات غذایی محصولات ماهی کمک می‌کند و باعث کیفیت و قیمت بازار یک محصول ماهی بسته‌بندی‌شده، می‌شود[۳۶].

همچنین فاس و همکاران (۲۰۲۰)[۳۷]، خاطر نشان کردند که استفاده از جاذب های 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

بررسی ها حاکی از این است که جاذب های اکسیژن در گوشت بسته‌بندی‌شده و محصولات گوشتی فراوری‌شده نیز استفاده‌شده است[۳۸]. در تحقیقی مشخص شده که کاربرد مواد آنتی اکسیدانی 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 میلی لیتر 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 درنتیجه تغییر خواص ارگانولپتیک و ارزش غذایی آن و درنتیجه کاهش ماندگاری آن می‌شود[۳۸]. کره به‌عنوان یکی از محصولاتی است که با استفاده از جاذب های اکسیژن در برابر تندشدگی محافظت می شود، دانشمندان اسپانیایی متوجه شدند که کاربرد جاذب اکسیژن، اثربخشی 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].

۳-۶-۲-پنیر

در تولید پنیر میکروارگانیسم ها نقش کلیدی دارند. کشت های آغازین برای تولید پنیر معمولاً مزوفیلیک هستند که از استارترهای سنتی تکثیرشده با لبنیات مشتق می‌شوند. بااین‌حال، برخی از میکروارگانیسم‌ها در تولید پنیر مفید بوده و برخی دیگر مفید نیستند و می توانند باعث فساد پنیر شوند. به‌طورکلی، پنیرهای سفت که محتوای آب بالایی ندارند، مستعد حمله کپک هستند، درحالی‌که پنیرهای مرطوب می توانند تحت تأثیر باکتری قرار گیرند. همچنین چربی های 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 تعیین‌شده 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، می تواند عمر ماندگاری پنیر سخت را افزایش دهد و از اکسیداسیون و رشد میکروارگانیسم های 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]. بااین‌حال، 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 ازنظر 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 دی اکسید کربن و به‌عنوان حامل ترکیبات ضد میکروبی، برای کاهش وزن و جلوگیری از فساد میکروبی مورداستفاده قرار گیرند[۴۲]. بااین‌حال، پوست منبع اصلی رشد کپک‌های سطحی است. به نظر می‌رسد یک‌راه حل جالب، استفاده از کاغذ پنیر با پوششی حاوی یک جاذب اکسیژن باشد که باعث می شود عمر مفید پنیرهای فاسدشدنی را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد[۴۳].

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

اکسیداسیون لیپید واکنشی است که از عوامل محدودکننده زمان نگهداری شیر خشک می باشد[۴۴]. تلاش هایی برای جلوگیری از این پدیده با استفاده از بسته‌بندی در گاز بی‌اثر یا خلأ گزارش‌شده است[۴۵]. پراکسیداسیون لیپیدی مسئول تغییرات در طعم و بوی شیر خشک است که درنتیجه‌ی محصولات واکنش ثانویه (آلکان ها، آلکن ها، آلدئیدها و کتون ها) ایجاد می شود. این ترکیبات بوی خارجی می‌دهد و باعث از بین رفتن مواد مغذی شیر خشک می‌شوند درنتیجه ماندگاری آن را محدود می کنند. اتو اکسیداسیون ناشی از اتصال اکسیژن به اسیدهای چرب غیراشباع مشکلی جدی برای لبنیات خشک به‌ویژه لبنیات پرچرب است[۴۶]. شیر خشک کامل حداکثر زمان نگهداری ۶ ماه در دمای اتاق دارد. بااین‌حال، اگر محصول در قوطی‌های بسته‌بندی‌شده تحت‌فشار کاهش‌یافته یا گاز بی‌اثر مانند نیتروژن 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 بسته‌بندی‌شده 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 بسته‌بندی‌شده می‌باشد. فناوری‌های نوین نه‌تنها روش‌های نگهداری مواد غذایی را بهبود بخشیده است، بلکه به زمینه‌هایی جدیدی در نگهداری مواد غذایی تبدیل شده است که قبلاً غیرعملی به‌نظر می رسید امروزه با افزایش آگاهی مردم نسبت به مضرات مصرف مواد نگهدارندهٔ شیمیایی تمایلات جامعه به استفاده از مواد غذایی تازه بدون نگهدارنده روندی روبه‌افزایش داشته است. از سویی دیگر عرضه‌کنندگان مواد غذایی در بازار سنتی و مارکت های مختلف خواستار افزایش عمر ماندگاری مادهٔ غذایی به‌صورت طبیعی می‌باشند. باتوجه‌به هزینهٔ اندک به‌کارگیری جاذب‌های اکسیژن در بسته‌بندی مواد غذایی می توان 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، ازجمله خشک سالی و زلزله و دیگر حوادث غیرقابل‌پیش‌بینی از این تکنولوژی نوین کمک گرفت. درنتیجه سیستم‌های جاذب اکسیژن بهبودیافته و فناوری بسته‌بندی فعال به کاهش تلفات محصولات غذایی در سوپرمارکت‌ها و افزایش قابلیت بازیافت و حذف مواد غیر دوستدار محیط‌زیست کمک می‌کنند. از سویی امروزه هدررفت مواد غذایی یک مشکل جهانی بوده که راهکار کامل و بی نقصی در این زمینه وجود ندارد و هرکدام از روش های موجود طرفداران و منتقدان مختص خودش را دارد؛ اما مطالعات اخیر در زمینهٔ بسته‌بندی مواد غذایی نشان می‌دهند که استفاده از جاذب‌های اکسیژن نه‌تنها می‌تواند باعث جلوگیری از تأثیرات مخرب اکسیژن و افزایش عمر ماندگاری شوند؛ بلکه عامل تأثیرگذاری در کاهش ضایعات مواد غذایی خواهند بود. از سویی پژوهش های اخیر در این حوزه گویای این مسئله هستند که جاذب‌های اکسیژن با مکانیسم‌های مختلف حذف‌کنندگی اکسیژن می‌توانند در طیف وسیعی از محصولات غذایی، ازجمله محصولات غله‌ای، میوه و سبزیجات، محصولات گوشتی و دریایی و خشکبار و آجیل‌ها و فراورده‌های لبنی مورداستفاده قرار بگیرند. در این پژوهش مروری به سیر تحولات و پیشرفت‌های انجام‌گرفته در حوزهٔ تولید، فرمولاسیون، کاربرد و مکانیسم جاذب‌های اکسیژن پرداخته شد و می توانیم از این جاذب های اکسیژن برای محافظت از محصول نهایی در برابر عوامل بیرونی و جایگزینی مناسب به‌جای نگهدارنده‌های ناسالم مانند سوربات، بنزوات، BHA،BHT، دی‌اکسیدسولفور استفاده کنیم؛ لذا تولیدکنندگان جاذب‌های اکسیژن در کشورهای درحال توسعه ازجمله ایران می توانند در اجرای استراتژی های تولید بیشتر و در دسترس قراردادن 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 applica- tions: 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 Kruijf, and J. Debevere, "Developments in the

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. Sängerlaub, 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. Tötzke, N. Kardjilov, R. Grothausmann, M. Dawson, and J. Banhart, "Investigation of Energy-Relevant Materials with 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. Noseda, 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

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. Clingeleffer, "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 ω3 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. Yeretzian, and S. Yildirim, "Prevention of lipid oxidation in linseed oil using a palladium-based oxygen scav-enging 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.

[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.