

علمی - مروری

مروری بر بسته‌بندی‌های فعال در بردارنده‌ی ترکیبات زداینده

سیده مهدیه اکبری^۱، علیرضا مهرگان نیکو^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران ۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1402.14.54.6.2

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

چکیده

وجود مقادیر بالای ترکیباتی چون اکسیژن، رطوبت، اتیلن و دی اکسید کربن در بسته‌بندی‌های فرآورده‌های غذایی منجر به آسیب‌پذیری و فساد زود هنگام آن‌ها می‌گردد. ظهور محصولات متنوع غذایی جدید و تقاضای مصرف کنندگان بر نظارت مستمر روی کیفیت آن‌ها، و نیز ضرورت کاهش فساد مواد غذایی در دوره‌ی نگهداری، منجر به توسعه برخی از فناوری‌های نوین بسته‌بندی، نظیر بسته‌بندی‌های فعال شده است. در این بررسی، مروری بر تکنیک‌های مورد استفاده در بسته‌بندی فعال شامل زداینده‌های اکسیژن، اتیلن، رطوبت، دی اکسید کربن و عطر و بوی نامطبوع ارائه شده است. زداینده‌های اکسیژن با حذف این ترکیب از بسته‌بندی، موجب ممانعت از رشد میکروب‌های هوازی، فساد و به حداقل رساندن تغییرات کیفی مواد غذایی حساس به اکسیژن می‌شوند. به منظور حذف اتیلن از فضای نگهداری محصولات فرازگرا و در نتیجه‌ی آن، کاهش سرعت فساد و افزایش زمان ماندگاری آن‌ها، از زداینده‌های این گاز استفاده شده است. هدف اصلی از کاربرد زداینده‌های رطوبت، کاهش میزان فعالیت آبی فرآورده می‌باشد که به نوبه خود موجب مهار رشد میکروبی، حفظ بافت مطلوب و مواد مغذی می‌گردد. سامانه‌های زداینده دی اکسید کربن، با زدودن مقادیر مازاد این گاز، از افزایش فشار یا حجم بسته‌های دارای مواد غذایی بو داده یا تخمیری جلوگیری نموده و زداینده‌های طعم و بوی نامطلوب، سبب بهبود کیفیت و مطلوبیت محصولات غذایی می‌گردند. در این مطالعه، همچنین روش‌های مرسوم به کار گرفته جهت حذف ترکیبات در بسته‌بندی، مکانیسم عمل و نیز مزایای سامانه‌های زدایش فعال و تأثیر آن‌ها در حفظ کیفیت و ماندگاری مواد غذایی بسته بندی شده مورد بررسی واقع شده است.

کلیدواژه‌ها: بسته‌بندی فعال، نگهداری مواد غذایی، ترکیبات زداینده، افزایش کیفیت و ماندگاری

۱- مقدمه

محافظت از مواد غذایی در برابر عوامل محیطی نظیر اکسیژن، رطوبت، گرد و غبار، نور، آفات و آلودگی‌های شیمیایی و میکروبی به شمار آمده و به این ترتیب سبب حفظ کیفیت و ایمنی غذا از تولید تا مصرف می‌شود. تقاضا برای بسته‌بندی مناسب، شفاف و ترجیح بر بسته‌بندی با اجزاء پایدارتر، منتهی به توسعه فناوری‌های بسته‌بندی نوین، نظیر بسته‌بندی فعال شده است که یکی از امیدبخش‌ترین فناوری‌ها در صنعت بسته‌بندی بوده و هدف آن افزایش ماندگاری، تضمین کیفیت و ایمنی مواد غذایی و بهبود ظاهر محصول می‌باشد [۳]، [۴]. بسته‌بندی فعال، نوعی از بسته‌بندیست که در آن اجزاء فرعی، درون یا بر روی مواد بسته‌بندی یا فضای داخلی آن گنجانده شده تا سبب بهبود عملکرد سامانه شوند. در این نوع از بسته‌بندی، مواد افزودنی می‌توانند به صورت ادغام شده در فیلم‌ها و پوشش‌های پلیمری و یا به شکل ساشه‌ها، پدها یا ورقه‌هایی در داخل ظرف قرار گیرند

با افزایش جمعیت جهان و الزام به رعایت مقررات رو به رشد ایمنی مواد غذایی، قابلیت‌ها و وظایف بسته‌بندی‌های مواد غذایی نیز در حال تغییر می‌باشند. افزایش آگاهی و تغییرات در سبک زندگی مصرف کنندگان، تقاضا برای تولید محصولات سالم، باکیفیت، تازه، کم فرآوری شده و آماده‌ی مصرف، با ماندگاری طولانی را افزایش داده که این، ضرورت و نیاز به فناوری بسته‌بندی مدرن را ایجاد نموده است [۱]، [۲]. بسته‌بندی به عنوان ظرفی برای غذا، نقشی مهم در حمل و نقل کارآمد درون زنجیره تأمین مواد غذایی ایفا نموده و غذا را از هرگونه آسیب فیزیکی و ناخنک زدن مصون می‌دارد؛ همچنین مانعی برای

* رایانامه نویسنده مسئول: a.mehregan@guilan.ac.ir

می‌نمایند [۶]، [۷]. نمای کلی از سامانه‌های زداینده‌ی فعال جهت کاربردهای غذایی در جدول (۱) گزارش شده است. ارائه یک روش بسته‌بندی نوآورانه برای افزایش ماندگاری محصولات غذایی با افزودن مواد افزودنی خاص، در فیلم‌ها و یا داخل فضای بسته‌بندی مواد غذایی علاوه بر افزایش ایمنی، موجب محدود شدن استفاده از افزودنی‌ها، کاهش ضایعات مواد غذایی و توسعه محصولات جدید می‌گردد [۵]. در این مطالعه انواع سامانه‌های زداینده‌ی فعال، تأثیر آن‌ها بر حفظ کیفیت و همچنین افزایش ماندگاری فرآورده‌های غذایی بسته‌بندی شده مورد بررسی واقع شده است.

[۵]. سامانه‌های بسته‌بندی فعال را می‌توان به دو دسته‌ی سامانه‌های زداینده‌ی فعال و آزاد کننده‌ی فعال تقسیم بندی نمود. زدایش یک فرآیند فیزیکی یا شیمیایی است؛ در زدایش فیزیکی یا سطحی، چسبیدن، اتصال یا جذب اتم‌ها، مولکول‌ها یا یون‌ها به سطح یک ماده دیگر انجام شده و در زدایش شیمیایی، نفوذ یک ماده به ساختار درونی زداینده صورت می‌گیرد. سامانه‌های زداینده‌ی فعال نظیر زداینده‌های اکسیژن، رطوبت، اتیلن، دی اکسید کربن و عطر و بو، ترکیبات نامطلوب را از غذا یا محیط آن حذف می‌کنند. سامانه‌های آزاد کننده‌ی فعال، ترکیبات اثرگذار، مانند ترکیبات ضد میکروبی، آنتی اکسیدان‌ها، دی اکسید کربن، طعم دهنده‌ها، اتیلن یا اتانول را به بسته غذایی اضافه

جدول (۱): سامانه‌های زداینده‌ی فعال مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی

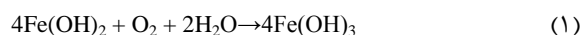
| منابع | عملکرد | نوع غذا | نوع زداینده‌ی فعال |
|------------|---|---|----------------------------|
| [۳]، [۸] | جلوگیری از تغییر رنگ | فرآورده‌های گوشتی | زداینده‌ی اکسیژن |
| | جلوگیری از رشد کپک | محصولات لبنی و نانویی | |
| | حفظ محتوای ویتامین C، جلوگیری از قهوه‌ای شدن | آب‌میوه و سبزیجات | |
| | جلوگیری از اکسایش چربی‌ها و روغن‌ها | دانه‌ها، آجیل، روغن، پودرهای فوری حاوی روغن، اسنک‌های سرخ شده | |
| [۹] | کاهش رسیدن و پیری، افزایش کیفیت و زمان ماندگاری | سبزیجات و میوه‌های فرازگرا | زداینده‌ی اتیلن |
| [۱۰]، [۱۱] | افزایش ماندگاری از طریق حفظ رطوبت، کاهش تراکم رطوبت در بسته‌بندی، تأثیر مثبت بر ظاهر، کاهش قهوه‌ای شدن یا تغییر رنگ | غذاهای خشک، ماهی، گوشت و فرآورده‌های آن‌ها، میوه‌ها و سبزیجات، ذرت، غلات، دانه‌ها | زداینده‌ی رطوبت |
| [۱۲] | بهبود کیفیت و ماندگاری، جلوگیری از آسیب فیزیکی به بسته‌بندی | غذا و نوشیدنی‌های تخمیری نظیر کیمچی، خمیرنان، آجو و...، قهوه برشته شده، محصولات تازه | زداینده‌ی دی اکسید کربن |
| [۶]، [۱۳] | بهبود ویژگی‌های حسی و کیفیتی محصولات | گوشت، ماهی و سایر محصولات گوشتی و دریایی، غذاهای حاوی چربی و پروتئین بالا، محصولات لبنی | زداینده‌ی بو و طعم نامطلوب |

۲- زداپنده‌های اکسیژن

استفاده از زداپنده‌های اکسیژن یکی از اصلی‌ترین فناوری‌ها در تکنولوژی بسته‌بندی‌های فعال بوده که هدف آن زدایش اکسیژن موجود در بسته‌بندی مواد غذایی یا بهبود خواص ممانعت‌کنندگی به‌عنوان یک حائل فعال است [۳]. وجود اکسیژن در بسته‌بندی غذا با اثربخشی بر رشد میکروارگانیسم‌هایی چون باکتری‌های هوازی، کپک‌ها و مخمرها، اکسیداسیون چربی‌ها، ویتامین‌ها و فساد محصولات را تسریع می‌نماید که اثرات آن در غذا به صورت بوی بد، طعم نامطبوع^۱، تغییر رنگ^۲ و آسیب به مواد مغذی ظاهر می‌شود [۱]، [۸]. بنابراین، عموماً روش‌های حذف اکسیژن از بسته‌بندی غذا مطلوب به شمار می‌آید. از روش‌های مرسوم به کار گرفته شده در این راستا، می‌توان به تزریق گاز و استفاده از اتمسفر اصلاح شده^۳ اشاره نمود که غلظت اکسیژن باقی‌مانده در بسته را به ۰/۵ تا ۵ درصد رسانیده و ممکن است در طول ذخیره سازی به دلیل تخلیه ناکافی، نفوذ پذیری مواد بسته‌بندی به اکسیژن، درزبندی ضعیف و یا آزاد شدن اکسیژن موجود در غذا به فضای بسته‌بندی افزایش یابد. به منظور بر طرف نمودن این مشکل، زداپنده‌های O₂ ایجاد شده‌اند که توانایی زدودن و کاهش سطح اکسیژن به کم‌تر از ۰/۰۱ درصد حجمی-حجمی را دارند [۳]، [۱۴]. سامانه‌های اصلی زدایش اکسیژن بر پایه‌ی آهن، پلاتین، پالادیوم، هیدروکربن‌های غیراشباع، توکوفرول‌ها، اسید آسکوربیک و یا زداپنده‌های بر پایه‌ی آنزیم‌ها یا میکروارگانیسم‌ها می‌باشند [۱].

۲-۱- زداپنده‌ی اکسیژن بر پایه‌ی آهن

زدودن اکسیژن با استفاده از ساشه‌های حاوی پودر آهن از جمله پرکاربردترین نمونه‌های این فناوری در صنایع غذایی می‌باشد. سامانه‌های زداپنده‌ی حاوی آهن، مبتنی بر اکسیداسیون آهن و نمک‌های آهنی موجود در بسته‌اند که با آب حاصل از غذا واکنش نشان داده، فلز آهن موجود در بسته‌بندی محصول را مرطوب نموده و آن را به شکل برگشت ناپذیری به یک اکسید پایدار به نام اکسید آهن سه‌آبه (Fe(OH)₃) تبدیل می‌کنند. پودر آهن در ساشه‌های کوچک قابل نفوذ به اکسیژن قرار دارد که آن را از تماس مستقیم با غذا باز می‌دارد [۵]، [۸]. سامانه‌های زداپنده‌ی اکسیژن که مبتنی بر واکنش‌های اکسیداسیون آهن هستند با معادله واکنش ذیل شرح داده می‌شوند.



دمیرهان و کندوگان (۲۰۱۷) تأثیر اتمسفر اصلاح شده (۷۰ درصد دی اکسید کربن و ۳۰ درصد نیتروژن) و زداپنده‌های اکسیژن بر پایه‌ی آهن، به عنوان سامانه بسته‌بندی فعال، بر تغییرات میکروبیولوژیکی و اکسایشی در گوشت ران مرغ نگهداری شده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۹ روز را ارزیابی نمودند. نتایج، نشان دهنده سرکوب رشد میکروبیولوژیکی و به تأخیر افتادن اکسایش لیپید و پروتئین در این محصول بود [۱۵]. در مطالعه‌ی کوتانج و آیهان (۲۰۲۱) افزایش ماندگاری نان حاصل از خمیر ترش با بسته‌بندی فعال حاوی زداپنده‌های اکسیژن در ظرفیت‌های مختلف، به همراه اتمسفر اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. برش‌های نان حاصل از خمیر ترش با استفاده از کیسه‌های پلی پروپیلن/پلی وینیلیدین با دو زداپنده‌ی اکسیژن بر پایه‌ی آهن (۱۰۰ و ۳۰۰ سی سی) در اتمسفرهای مختلف هوا (۵۰ درصد دی اکسید کربن، ۵۰ درصد نیتروژن) بسته‌بندی و به مدت ۱۸ روز در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. کاهش میزان اکسیژن اولیه (۲۱ درصد) به زیر ۱ درصد در فضای فوقانی بسته‌های دارای زداپنده‌ی با ظرفیت بالا پس از ۶ روز و در بسته‌های حاوی زداپنده‌ی کم ظرفیت طی ۹ روز مشاهده شد. محصول بسته‌بندی شده در محتوای اتمسفری ۱۰۰ درصد نیتروژن و با ظرفیت بالای زدایش، بیش‌ترین امتیازات حسی، کم‌ترین رشد میکروبی و بیش‌ترین ماندگاری را در میان سایر تیمارها کسب نمود [۱۶].

۲-۲- زداپنده‌ی اکسیژن بر پایه‌ی اسید آسکوربیک

اساس سامانه‌های زداپنده‌ی اکسیژن بر پایه‌ی اسید آسکوربیک (AA)، اکسیداسیون آسکوربات به دهیدروآسکوربیک اسید (DHAA^۴) است. اسید آسکوربیک در نتیجه احیاء نمودن Cu²⁺ را به Cu⁺، دهیدروآسکوربیک اسید تشکیل می‌دهد. علاوه بر این، یون مس یک کمپلکس با O₂ برقرار نموده که در نتیجه‌ی آن، رادیکال آنیونی سوپراکسید ایجاد می‌شود. در حضور مس، از این رادیکال O₂ و H₂O₂^۵ تشکیل شده و پس از آن کمپلکس آسکوربات مس، هیدروژن پراکسید (H₂O₂) را بدون تشکیل OH که یک اکسیدان بسیار واکنش پذیر است به H₂O تبدیل می‌کند [۱۷]. واکنش سامانه فعال زداپنده‌ی اکسیژن توسط اسید آسکوربیک را می‌توان به صورت معادله‌ی واکنش زیر خلاصه نمود.



⁴ Dehydroascorbic Acid

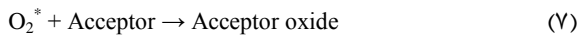
⁵ Hydrogen Peroxide

¹ Unpleasant taste

² Color change

³ Modified Atmosphere Packaging (MAP)

است. هنگامی که فیلم، تحت اشعه ماوراء بنفش (UV^1) قرار می‌گیرد، O_2 توسط رنگ به حالت یگانه فعال شده و موجب تسریع واکنش حذف اکسیژن می‌شود؛ به این ترتیب که ترکیب گیرنده^۲ را به حالت اکسید شده^۳ تبدیل می‌نماید [۵]، [۱۷].



۲-۵- زداینده‌ی اکسیژن بر پایه‌ی پالادیوم

پالادیوم به عنوان کاتالیزور در محیطی با اتمسفر اصلاح شده کاربرد دارد؛ به این طریق که منجر به تولید آب از اکسیژن در حضور هیدروژن می‌شود [۸]. در همین رابطه فاس و همکاران (۲۰۲۰) برای جلوگیری از اکسیداسیون لیپید در روغن بذر کتان، یک فیلم زداینده‌ی اکسیژن از جنس پالادیوم تهیه نمودند. مطالعه‌ی آن‌ها مشخص نمود که فیلم زداینده‌ی تهیه شده در ترکیب با اتمسفر کنترل شده به طور قابل توجهی اکسیداسیون لیپید را در روغن بذر کتان در مقایسه با بسته‌بندی معمولی کاهش داد [۲۰].

۲-۶- سایر زداینده‌های اکسیژن

از دیگر زداینده‌های اکسیژن می‌توان زداینده‌های هیدروکربنی غیراشباع را نام برد که در بسته‌بندی غذاهای خشک کاربرد دارند اما منجر به تولید محصولات جانبی از جمله آلدئیدها و کتون‌ها می‌شوند که کیفیت حسی غذا را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱]. توکوفرول‌ها شکل طبیعی ویتامین E هستند که نرخ زداینده‌ی آرامی داشته و باید با استفاده از اشعه ماوراء بنفش، نور و یا فلزات واسطه نظیر آهن فعال شوند؛ لذا در مقایسه با زداینده‌های بر پایه‌ی آهن از هزینه بالاتری برخوردارند. زداینده‌های میکروارگانیک نسبت به تغییرات دما حساس بوده و از دیگر مشکلات استفاده از این نوع زداینده‌ها رشد کنترل نشده میکروارگانیک‌هایی است که بر ویژگی‌های حسی غذا اثر نامطلوب می‌گذارند [۱]، [۸].

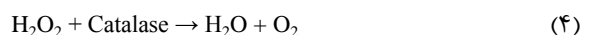
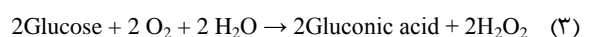
۳- زداینده‌های اتیلن

اتیلن، هورمون محرک رشد گیاه بوده که از طریق افزایش سرعت تنفس محصولات فرازگرا، رسیدن و پیری را سرعت بخشیده و سبب کاهش ماندگاری در طول ذخیره سازی پس از برداشت

در مطالعه‌ی مدرس‌ی و نیازمند (۲۰۲۱) فیلم پلی اتیلنی با چگالی کم و حاوی زداینده‌ی اکسیژن بر پایه نانوذرات آسکوربات سدیم (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) به روش اکستروژن تولید شد و عملکرد آن جهت جلوگیری از اکسیداسیون بادام زمینی بسته‌بندی شده در طول دوره‌ی نگهداری در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد به مدت یک ماه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده‌ی تأثیر کاربرد این فیلم‌ها بر به تأخیر انداختن اکسیداسیون لیپید در بادام زمینی بسته‌بندی شده و افزایش ماندگاری آن بود [۱۸]. در مطالعه دیگری لی و همکاران (۲۰۱۸) از زداینده‌ی اکسیژن شامل کربن فعال و سدیم ال-آسکوربات برای نگهداری مناسب قطعه گوشت خام استفاده نمودند. برای تهیه فرمولاسیون بهینه، نسبت‌های مختلف اجزا (۱/۱، ۱/۱، ۲/۱، ۴/۱، ۶/۱، ۸/۱ و ۱۲/۱ وزنی- وزنی) آماده شدند و حجم اکسیژن زدایی آن‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴ روز اندازه گیری شد. نتایج، نشان دهنده کارایی بالاتر فرمول با نسبت ۱/۱، ۶/۱ وزنی- وزنی بود. علاوه بر این، تغییرات میکروبیولوژیکی و تأثیر بر اکسایش لیپید در طول ذخیره سازی در دمای ۴ درجه سانتی گراد به مدت ۴ روز مورد بررسی واقع گردید. بسته بندی‌های دارای ساشه‌ی زداینده، سبب مهار اکسایش لیپیدها و کاهش رشد میکروبی در گوشت شد؛ در نتیجه استفاده از آن به عنوان یک ماده بسته‌بندی مناسب برای محافظت از محصولات گوشتی در برابر اکسایش لیپید و آلودگی میکروبی پیشنهاد گردید [۱۹].

۲-۳- زداینده‌ی اکسیژن بر پایه‌ی آنزیم

اساس سامانه‌های زداینده‌ی اکسیژن بر پایه‌ی آنزیم، اکسیداسیون انجام شده توسط آنزیم گلوکز اکسیداز می‌باشد که دو هیدروژن را از گروه -CHOH- گلوکز، ضمن تشکیل گلوکونو دلتا لاکتون و H_2O_2 به O_2 منتقل کرده، سپس لاکتون به طور خود به خود با آب واکنش داده و اسید گلوکونیک تولید می‌شود. در چنین واکنش‌هایی یک آلاینده طبیعی به طور پیش فرض در تهیه گلوکز اکسیداز یافت می‌شود، بنابراین، کاتالاز با H_2O_2 واکنش داده و ایجاد H_2O و O_2 می‌گردد که می‌تواند منجر به کاهش کارایی سامانه شود. پراکسید هیدروژن تشکیل شده به دلیل ویژگی نامطلوب آن به پراکسید تجزیه می‌شود [۵].



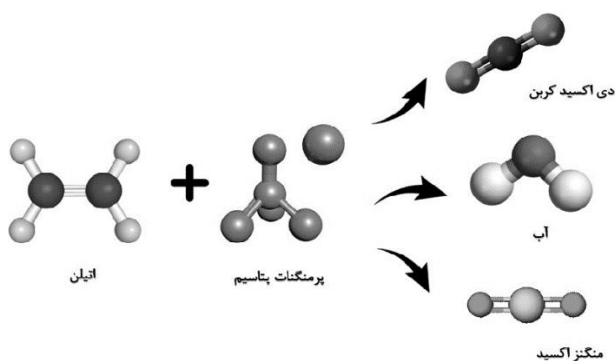
۲-۴- زداینده‌ی اکسیژن بر پایه‌ی رنگ حساس به نور

نور یکی دیگر از تکنیک‌های زدایش اکسیژن، اکسیداسیون رنگ (Dye) حساس به نور بوده که روی یک فیلم پلیمری آغشته شده

¹ Ultraviolet

² Acceptor

³ Acceptor oxide



شکل (۱): واکنش اکسیداسیون اتیلن توسط زداپنده‌ی پرمنگنات پتاسیم

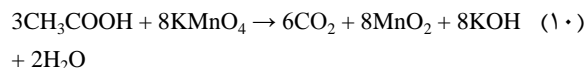
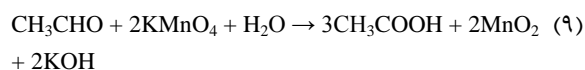
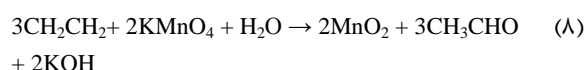
خاک رس، زئولیت، ورمیکولیت، سیلیکاژل و کربن فعال از دیگر ترکیباتی هستند که به عنوان مواد بی‌اثر، متخلخل و با سطح بالا جهت زدایش اتیلن مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱].

حذف اتیلن توسط زئولیت در صنایع کشاورزی و غذایی مورد توجه است. متمایزترین ویژگی زئولیت‌ها متخلخل بودن آن‌ها همچنین ساختار سه بعدی با خواص تبادل کاتیونی، جذب و جداسازی مولکولی است. از این رو، ماده با ارزشی در کاربردهای تجاری می‌باشد [۲۲]. دبرویجن و همکاران (۲۰۱۹) از زداپنده‌هایی بر پایه‌ی روی و مس واقع بر زئولیت طبیعی، جهت سنجش ظرفیت زدایش اتیلن و تأثیر آن بر ویژگی‌های کیفی گوجه فرنگی در طول انبارمانی استفاده نمودند. نتایج این بررسی حاکی از تأثیر تیمار ذکر شده بر حذف اتیلن، کاهش نرخ تنفس، به تأخیر انداختن رسیدن و پیری در گوجه فرنگی بود [۲۴].

کربن‌های فعال، شکلی از کربن و حاصل از تجزیه ماده کربنی در اثر حرارت بوده و دارای ساختار متخلخل و غیر کریستالی می‌باشند که سطح بالایی داشته و هزینه تولید آن‌ها نسبتاً ارزان است. این‌ها می‌توانند به شکل دانه‌ای، پودری یا الیافی باشند که نوع دانه‌ای به دلیل سازگاری طبیعی و ظرفیت بالاتر جذب اتیلن، ایده‌آل‌ترین شکل جهت استفاده می‌باشد. به‌منظور افزایش ظرفیت جذب، کربن فعال را می‌توان با سایر ترکیبات نظیر پرمنگنات پتاسیم ادغام نمود [۱]، [۲۲].

یکی از راه‌حل‌های مطلوب برای حذف اتیلن، سامانه فوتوکاتالیست^۱ بر پایه‌ی نانو دی‌اکسید تیتانیوم است. اکسیداسیون فوتوکاتالیستی گاز اتیلن، شامل قرار گرفتن در معرض اشعه ماوراء بنفش و استفاده از یک کاتالیزور نظیر دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂) می‌باشد. در این مکانیسم اتیلن به دی‌اکسید کربن و آب اکسید می‌شود. سامانه زدایش بر پایه‌ی

می‌گردد. این گاز همچنین سرعت تخریب کلروفیل را به ویژه در محصولات برگ‌دار و نیز سرعت نرم شدن میوه‌ها را افزایش می‌دهد. به همین دلیل حذف آن از محیط محصول با استفاده از زداپنده‌های مربوطه، سرعت زوال را کاهش داده و در نتیجه سبب افزایش کیفیت و ماندگاری آن‌ها می‌شود (شکل (۲)) [۳]، [۱۴]، [۲۱]. پیوند دوگانه موجود در ساختار مولکولی اتیلن موجب واکنش پذیری بالای آن گردیده و امکان به کارگیری طیف گسترده‌ای از روش‌های تجاری در جهت مهار این هورمون را فراهم می‌آورد [۱]. سامانه‌های زدایش اتیلن شامل گنجاندن ساشه‌های کوچک حاوی زداپنده‌ی مناسب، در فضای داخلی بسته یا گنجاندن آن‌ها در پوشش بسته‌بندی است. ساشه‌ها باید امکان نفوذ و انتشار را برای اتیلن فراهم کنند [۵]، [۹]. معمول‌ترین و پرکاربردترین جزء فعال ساشه، سامانه‌های زداپنده‌ی مبتنی بر پرمنگنات پتاسیم (KMnO₄) است که اتیلن را به دی‌اکسید کربن و آب اکسید نموده که در اثر آن تغییر رنگ از بنفش به قهوه‌ای که نشان دهنده کاهش توانایی جذب اتیلن است، صورت می‌گیرد. پرمنگنات پتاسیم به دلیل سمیت بالا هیچ‌گاه در تماس مستقیم با مواد غذایی استفاده نمی‌شود. محتوای پرمنگنات مورد استفاده معمولاً بین ۴ تا ۶ درصد است. در برخی از این سامانه‌ها، جهت گسترش سطح جذب، از پرمنگنات پتاسیم تثبیت شده روی آلومینا یا سیلیکاژل استفاده می‌گردد [۳]، [۲۱]، [۲۲]. حذف اتیلن توسط پرمنگنات پتاسیم به شرح معادلات واکنش ذیل صورت می‌پذیرد.



از معادلات (۸) تا (۱۰) معادله زیر دریافت می‌شود.



چنانچه ملاحظه می‌شود بر اساس معادلات واکنش (۸) تا (۱۰)، ابتدا اکسیداسیون اتیلن به استالدهید (CH₃CHO) انجام شده، سپس ترکیب حاصله به اسید استیک اکسید شده و در مرحله بعد، اکسیداسیون اسید استیک به دی‌اکسید کربن و آب صورت می‌پذیرد. واکنش کلی حذف اتیلن در معادله (۱۱) نشان داده شده است که طبق آن پرمنگنات پتاسیم، اتیلن (C₂H₄) را به دی‌اکسید کربن (CO₂) و آب (H₂O) اکسید نموده و دی‌اکسید منگنز (MnO₂) و هیدروکسید پتاسیم (KOH) آزاد می‌نماید (شکل (۱)) [۲۲]، [۲۳].

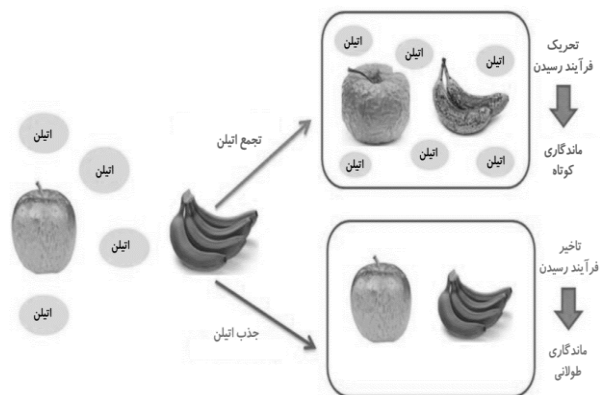
^۱ Photocatalyst

۴- زداینده‌های رطوبت

رطوبت یکی از آزاردهنده‌ترین عوامل در صنایع غذایی است که در تمامی مراحل از جمله نگهداری مواد اولیه و محصول نهایی در انبارها و در حین حمل و نقل می‌تواند اثرات مخرب داشته باشد [۲۹]. به عنوان مثال بسیاری از محصولات خشک در طول ذخیره سازی به رطوبت حساس‌اند؛ حتی سطوح پایین رطوبت نسبی در بسته‌های غذایی ممکن است موجب تغییر بافت و ظاهر، از دست دادن عوامل مغذی و کیفی و در نتیجه کاهش ماندگاری محصول شود. علاوه بر این، خروج شیرابه و تجمع مایع اضافی در بسته‌بندی محصولات تازه چون ماهی و گوشت، منجر به کاهش جذابیت و مطلوبیت آن‌ها برای مصرف کنندگان می‌شود [۳]. جهت کنترل رطوبت استراتژی‌هایی نظیر بسته‌بندی‌های با اتمسفر اصلاح شده، بسته‌بندی‌های تحت خلاء، جایگزینی هوای مرطوب با گاز خشک و بسته‌بندی‌های مانع‌کننده به کار گرفته شده است. یک راهکار مناسب، استفاده از زداینده‌های رطوبت می‌باشد که معمولاً به شکل پد، ساشه، فیلم و ورقه تولید شده و مهار رطوبت را از طریق جذب فیزیکی انجام می‌دهند [۳۰]. این‌ها به صورت کنترل کننده‌های رطوبت نسبی (نظیر خشک کننده‌ها) برای حذف رطوبت از فضای فوقانی بسته و حذف کننده‌های رطوبت (نظیر پدها و ورقه‌ها) برای جذب مایعات تراوش شده از محصولات غذایی یا آب چگالش شده در اثر رطوبت اشباع، مورد استفاده قرار داده می‌شوند (شکل ۳). از انواع آلی این زداینده‌ها نیز استفاده می‌گردد؛ فروکتوز به عنوان یک مونوساکارید جاذب الرطوبه، در رطوبت نسبی^۱ محیط حدوداً ۵۵ درصد، رطوبت را جذب می‌نماید [۱]. بووی و همکاران (۲۰۱۸) پدهای حاوی فروکتوز را به منظور جذب رطوبت به بسته‌بندی توت فرنگی تازه اضافه نمودند. پدهای حاوی ۳۰ درصد فروکتوز، بالاترین میزان جذب را از خود نشان دادند. به علاوه، توت فرنگی‌های واقع در این بسته‌ها کاهش وزن کمتری داشتند [۲۹]. سوربیتول به شکل پودر سفید رنگ در دسترس است که می‌توان آن را در ساشه‌هایی قرار داد و در بسته‌بندی‌های غذایی به کار گرفت. سلولز و مشتقات آن چون کربوکسی متیل سلولز^۲ به عنوان زداینده‌ی رطوبت توسط محققان مختلف برای سامانه‌های بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مواد معدنی نظیر کلسیم اکسید، پتاسیم کلرید، پتاسیم کربنات، کلسیم کلرید و بنتونیت به گستردگی در تولید صنعتی این زداینده‌ها کاربرد دارند. مهم‌ترین معایب مواد آلی، قیمت بالاتر و ظرفیت کم‌تر

دی‌اکسید تیتانیوم به دما یا فشار بالا برای مهار نیازی ندارد و در مقایسه با اکسیداسیون کاتالیزوری حرارتی، انرژی کمتری نیاز دارد [۲۱]، [۲۲].

بهم‌ماس (۲۰۲۰) کاربرد نانوالیاف زئین-اکسید تیتانیوم را به عنوان زداینده‌ی اتیلن جهت بهبود ذخیره سازی و انبارمانی گوجه فرنگی گیلادی مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه از نانوالیاف‌هایی با قطر کم به عنوان زداینده‌ی اتیلن در نگهداری گوجه فرنگی گیلادی به مدت ۲۲ روز استفاده شد. مقایسه میزان اتیلن در بسته‌های دارای ساشه‌های نانوالیاف و بسته‌های شاهد حاکی از کاهش این گاز در بسته‌های دارای زداینده بود [۲۵]. در مطالعه‌ی ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۰) نانوکامپوزیتی حاوی نانو ذرات سیلیس و رس به همراه پرمنگنات پتاسیم را تهیه و زدایش اتیلن بالا و نفوذپذیری پایین به بخار آب را در آن بهینه سازی نمودند و موفق به افزایش ماندگاری ۱۵ روزه‌ی موز به این طریق گردیدند [۲۶]. پژوهش دیگری توسط هرناندز و همکاران (۲۰۲۱) به منظور تهیه ساشه‌های زداینده‌ی اتیلن با اثر ضدقارچی انجام گرفت. در مرحله اول، تیمول آزاد یا تیمول درون پوشانی شده در دوزهای مختلف به ساشه‌های حاوی سپیولیت^۱ با پرمنگنات پتاسیم اضافه و در دمای ۱۱ درجه سانتی‌گراد روی گوجه فرنگی‌های گیلادی ارزیابی شدند. زداینده‌های اتیلن استفاده شده در این مطالعه در کنترل بیماری‌های قارچی پس از برداشت و در عین حال حفظ کیفیت میوه مفید بودند [۲۷]. در مطالعه‌ی واریسکی (۲۰۱۸) بسته‌بندی فعال بر پایه‌ی کیتوزان و پرمنگنات پتاسیم به صورت فیلم فعال در بسته گوجه فرنگی قرار گرفت. وجود فیلم زداینده، موجب تأخیر در رسیدن و افزایش سختی گوجه فرنگی‌های تیمار شده در مقایسه با نمونه شاهد گردید [۲۸].



شکل (۲): تأثیر تجمع و زدایش اتیلن بر رسیدن و ماندگاری میوه‌های تازه

¹ Relative humidity (RH)

³ Carboxymethyl Cellulose (CMC)

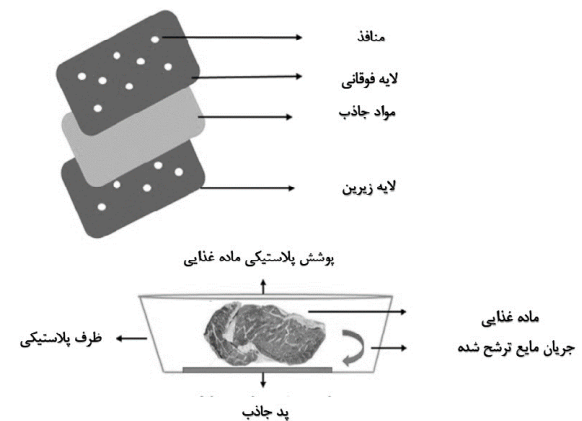
² Sepiolite

تنفس، تخمیر و غذاهای برشته شده مانند قهوه آسیاب شده و... مورد استفاده گرفته‌اند. ساشه‌های زداپنده‌ی اکسیژن و دی اکسید کربن در قهوه، برای به تأخیر انداختن یا کاهش سرعت تغییرات طعم اکسیداتیو و زدودن دی اکسید کربن تولید شده به کار رفته‌اند؛ چرا که عدم مهار و زدایش آن‌ها موجب ترکیدن بسته می‌گردد [۲]، [۵]. معمولاً رایج‌ترین ترکیب فعال این نوع زداپنده‌ها، هیدروکسید کلسیم است که در رطوبت بالا با دی اکسید کربن واکنش داده و منجر به تولید کربنات کلسیم در بسته‌بندی مواد غذایی می‌گردد. زداپنده‌های دی اکسید کربن از فشار گاز تولید شده داخل بسته‌بندی یا انبساط حجم در بسته‌بندی‌های انعطاف پذیر که در نتیجه‌ی تخمیر یا برشته شدن مواد غذایی رخ می‌دهد، جلوگیری می‌نمایند [۱۲].

در مطالعه‌ی لی و همکاران (۲۰۱۹) تولید مواد بسته‌بندی حاوی هیدروکسید کلسیم با عملکرد زداپندگی دی اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفت. بسته‌بندی حاوی ماده‌ی زداپنده، خواص مکانیکی بهبود یافته‌ای از خود نشان دادند. نتایج این مطالعه، حاکی از آن بود که غلظت دی اکسید کربن را می‌توان با استفاده از مواد بسته‌بندی دارای مواد زداپنده کنترل نمود [۳۴]. لی و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ی دیگری بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی حاوی ماده زداپنده‌ی هیدروکسید کلسیم با افزودن اسید استئاریک را مورد بررسی قرار دادند. اسید استئاریک در غلظت‌های (۵ و ۴، ۳، ۲، ۱ درصد) اضافه شد. این اسید به عنوان عامل فعال سطحی به منظور کم کردن تراکم زداپنده‌ها در فیلم عمل می‌کند. تراکم کمتر منجر به بهبود استحکام کششی، کاهش سرعت انتقال بخار آب و افزایش عبور نور می‌شود که به نوبه خود، خواص فیزیکی و مکانیکی فیلم‌ها را بهبود می‌بخشد. با افزودن بیش از ۲ درصد اسید استئاریک به زداپنده‌ها، خواص مکانیکی و فیزیکی فیلم بهبود یافت و عملکرد جذب دی اکسید کربن مطلوب گردید [۳۵]. وانگ و همکاران (۲۰۱۷) کاربرد ساشه‌هایی حاوی کربنات سدیم، مخلوطی از این ترکیب به همراه هیدروکسید کلسیم و پدهایی آغشته به کربنات سدیم، به عنوان زداپنده‌ی رطوبت و دی اکسید کربن در بسته بندی قارچ شیتاکه^۱ برای مدت ماندگاری ۵ روز در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاکی از تأثیر ساشه‌های به کار گرفته شده در کاهش محتوای رطوبت و دی اکسید کربن بود [۳۶]. در مطالعه‌ی هان و همکاران (۲۰۱۹) زداپنده‌ی دی اکسید کربن از باگاس نیشکر تهیه شده و غنی‌سازی نیتروژن در آن با استفاده از

آن‌ها در جذب رطوبت در مقایسه با جاذب‌هایی بر پایه‌ی مواد معدنی است [۱]، [۳۰].

چن و همکاران (۲۰۱۸) فیلم‌های فعال با عملکرد جذب رطوبت و همچنین خواص آنتی‌اکسیدانی، بر اساس پلی وینیل الکل و عصاره چای سبز تهیه نموده و در بسته بندی مارماهی خشک شده به کار گرفتند. فیلم حاوی ۲ درصد عصاره، بهترین رویکرد را از خود نشان داد [۳۱]. مورما و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه‌ای جهت انتخاب بهترین بسته‌بندی فعال با اتمسفر اصلاح شده و زداپنده‌های رطوبت و اتیلن برای حفظ کیفیت میوه گواوا^۱ در طول نگهداری در دمای پایین انجام دادند. در این بسته‌بندی ساشه‌های زداپنده‌ی رطوبت حاوی ۳۰ تا ۵۰ گرم سیلیکاژل و ساشه‌های زداپنده‌ی اتیلن حاوی ۰ تا ۴ گرم پرمنگنات پتاسیم به کار برده شدند. نتایج حاکی حفظ مواد مغذی و افزایش ماندگاری میوه گواوا بود [۳۲].



شکل (۳): ساختار پد جاذب رطوبت چند لایه در بسته‌بندی غذایی

۵- زداپنده‌های دی اکسید کربن

دی اکسید کربن به هنگام رشد میکروارگانیسم‌ها و نیز هنگام تنفس مواد غذایی مانند سبزیجات و میوه‌ها تولید می‌شود. وجود این گاز در بسته‌بندی مواد غذایی، از رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری نموده، آسیب‌های ناشی از پوسیدگی و فساد را کاهش و ماندگاری محصول را افزایش می‌دهد. با وجود این مزایا، غلظت بالای این گاز می‌تواند بر مواد غذایی بسته‌بندی شده تأثیر منفی بگذارد؛ بنابراین، بهبود فناوری بسته‌بندی برای کنترل این گاز ضروری است [۳۳]، [۳۴]. ساشه‌های زداپنده‌ی دی اکسید کربن معمولاً از هیدروکسید کلسیم، هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم، اکسید کلسیم و سیلیکاژل تشکیل شده‌اند. از نظر تجاری این نوع از زداپنده‌ها جهت حذف دی اکسید کربن حاصل شده از

^۱ Shiitake

^۳ Guava

حاکی از افزایش زدایش بو تا ۸۰ درصد و امکان استفاده از این زداینده در فیلتراسیون بود [۴۰].

۷- نتیجه گیری

عوامل متعددی بر حفظ کیفیت و ایمنی فرآورده‌های غذایی اثرگذار بوده که در این میان کنترل اتمسفر داخل بسته‌بندی غذا از اهمیت بالایی برخوردار است. وجود ترکیبانی نظیر اکسیژن، اتیلن، دی‌اکسید کربن و رطوبت، اثرات مفید و مضر متعددی بر کیفیت مواد غذایی داشته و به‌منظور افزایش زمان ماندگاری این محصولات، زدودن این ترکیبات از فضای نگهداری آن‌ها، امری ضروری می‌باشد. کاربرد بسته‌بندی فعال با قابلیت منحصر به فرد آن در کنترل جو داخلی بسته از طریق زدایش یا آزادسازی ترکیبات خاص، به‌منظور افزایش ماندگاری محصولات فسادپذیر به تأیید رسیده و مورد استفاده واقع می‌شود. سامانه‌های زداینده‌ی فعال با زدایش ترکیبات نامطلوب، به روش فیزیکی (جذب سطحی) و شیمیایی (اکسایش)، نقش مهمی در افزایش ماندگاری، کیفیت، ایمنی و در نتیجه کاهش هدررفت محصولات غذایی دارند. با توجه به موارد فوق، بسته‌بندی فعال یکی از محورهای اصلی توسعه‌ی بسته‌بندی مواد غذایی در آینده بوده و افزایش مقیاس و صنعتی شدن آن، می‌تواند چالش برانگیز باشد. پیاده‌سازی این فناوری‌ها وابسته به پذیرش مصرف‌کننده، قانون‌گذاری دقیق و مقرون به صرفه بودن بسته‌بندی نهایی برای صنعت و مصرف‌کنندگان خواهد بود. با این حال، مطالعات و پیشرفت‌های اخیر در این حوزه می‌تواند به دانشمندان مواد غذایی و بسته‌بندی درک بهتری از قابلیت‌ها و مزایای فناوری‌های بسته‌بندی فعال را ارائه نموده و به این ترتیب به فرایند تجاری شدن آن‌ها سرعت بخشد.

۸- مراجع

- [1] M. Soltani Firouz, K. Mohi-Alden, and M. Omid, "A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development," *Food Res. Int.*, vol. 141, no. July 2020, p. 110113, 2021, doi: 10.1016/j.foodres.2021.110113.
- [2] M. Selvamuthukumar, *Active Packaging for Various Food Applications*, Illustrate., vol. 214 pages. CRC Press, 2021, 2021.
- [3] S. Yildirim et al., "Active Packaging Applications for Food," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 17, no. 1, pp. 165-199, 2018, doi: 10.1111/1541-4337.12322.
- [4] A. K. Singh, D. Ramakanth, A. Kumar, Y. S. Lee, and K. K. Gaikwad, "Active packaging technologies for clean label food products: a review," *J. Food Meas. Charact.*, vol. 15, no. 5, pp. 4314-4324, 2021, doi: 10.1007/s11694-021-01024-3.
- [5] A. Bhardwaj, T. Alam, and N. Talwar, "Recent Advances in Active Packaging of Agri-food Products: a Review," 2019. [Online]. Available: <http://www.jpht.info>

اوره و هیدروکسید پتاسیم انجام شد. تأثیر پارامترهایی نظیر افزودن اوره، نسبت هیدروکسید پتاسیم به کربن و دمای فعال سازی بر ویژگی‌های بافتی منافذ و ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از نقش مهم منافذ باریک و محتوای نیتروژن بر عملکرد زداینده بود و حداکثر جذب دی‌اکسید کربن در این بررسی، ۴٫۸ میلی مول بر گرم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار گزارش شد [۳۷].

۶- زداینده‌های طعم و بوی نامطبوع

مفهوم بسته‌بندی فعال در برگیرنده‌ی حذف عطر و طعم نامطبوع نیز می‌باشد. کاربردهای زداینده‌ی بوی نامطبوع، شامل حذف آمین تولید شده در اثر اکسیداسیون غذاهای غنی از پروتئین نظیر ماهی، حذف آلدئیدهای حاصل از اکسیداسیون اسیدهای چرب موجود در بیسکویت‌ها، غذاهای سرخ شده و غلات، بوی ترش و کره‌ای حاصل از محصولات لبنی و نیز حذف ترکیبات تلخ مزه مانند لیمونن در آب‌میوه است. معمولاً بوهای ناخوشایند در هنگام تجزیه پروتئین به دلیل آزادسازی ترکیبات گوگردی مانند هیدروژن سولفید و در طی اکسیداسیون چربی‌ها و روغن‌ها به دلیل تشکیل آلدئیدها و کتون‌ها ایجاد می‌شود [۶]. از مؤثرترین روش‌های رفع این مشکل استفاده از زداینده‌ها می‌باشد. زداینده‌های معمولی شامل کربن فعال و سیلیس است و رایج‌ترین زداینده‌های صنعتی شامل زئولیت‌ها و سیکلودکسترین‌ها می‌باشند [۳۳].

شین و همکاران (۲۰۱۸) یک روش جدید کنترل بو را با استفاده از پلی اتیلن با چگالی کم و تری استیل بتا سیکلودکسترین مورد بررسی قرار دادند. سه ترکیب هدف، از جمله دی‌متیل دی‌سولفید، دی‌متیل سولفید و دی‌سولفید کربن به طور موثری در این روش حذف شدند. نتایج نشان دهنده پتانسیل بالای این زداینده‌ها برای حذف بوی نامطلوب در بسته‌بندی مواد غذایی بود [۳۸]. یانگ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای حذف عطر و طعم نامطلوب از آب هندوانه تیمار شده با استفاده از زداینده‌ی بتاسیکلودکسترین، صمغ زانتان، سدیم کربوکسی متیل سلولز و شکر/اسید را بررسی نمودند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دهنده حذف مؤثر بوی نامطبوع، توسط بتاسیکلودکسترین بود [۳۹]. در مطالعه‌ی قربانی و همکاران (۲۰۱۹) به منظور زدودن بوی آلدئیدی بسیار قوی و تند هگزانال که نشانگر اکسیداسیون روغن و چربی است، تهیه نانوالیاف الکترورسی شده‌ی استات سلولز و حاوی مولکول‌های مخروطی شکل بتاسیکلودکسترین مورد آزمون قرار گرفت. نتایج

- [21] N. Pathak, O. J. Caleb, M. Geyer, W. B. Herppich, C. Rauh, and P. V. Mahajan, "Photocatalytic and Photochemical Oxidation of Ethylene: Potential for Storage of Fresh Produce—a Review," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 10, no. 6, pp. 982–1001, 2017, doi: 10.1007/s11947-017-1889-0.
- [22] K. K. Gaikwad, S. Singh, and Y. S. Negi, "Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 269–284, 2020, doi: 10.1007/s10311-019-00938-1.
- [23] H. Wei, F. Seidi, T. Zhang, Y. Jin, and H. Xiao, "Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: A review," *Food Chem.*, vol. 337, no. February 2020, p. 127750, 2021, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127750.
- [24] J. de Bruijn, A. E. Gómez, P. Melín, C. Loyola, V. A. Solar, and H. Valdés, "Effect of doping natural zeolite with copper and zinc cations on ethylene removal and postharvest tomato fruit quality," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 75, no. September 2018, pp. 265–270, 2019, doi: 10.3303/CET1975045.
- [25] B. W. Böhmer-Maas, L. M. Fonseca, D. M. Otero, E. da Rosa Zavareze, and R. C. Zambiazzi, "Photocatalytic zein-TiO₂ nanofibers as ethylene absorbers for storage of cherry tomatoes," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 24, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100508.
- [26] A. Ebrahimi et al., "Novel strategies to control ethylene in fruit and vegetables for extending their shelf life: A review," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 5, pp. 4599–4610, 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03485-x.
- [27] M. H. Álvarez-Hernández, G. B. Martínez-Hernández, N. Castillejo, J. A. Martínez, and F. Artés-Hernández, "Development of an antifungal active packaging containing thymol and an ethylene scavenger. Validation during storage of cherry tomatoes," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 29, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.fpsl.2021.100734.
- [28] E. Warsiki, "Application of chitosan as biomaterial for active packaging of ethylene absorber," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 141, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/141/1/012036.
- [29] G. G. Bovi, O. J. Caleb, E. Klaus, F. Tintchev, C. Rauh, and P. V. Mahajan, "Moisture absorption kinetics of FruitPad for packaging of fresh strawberry," *J. Food Eng.*, vol. 223, pp. 248–254, 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.10.012.
- [30] K. K. Gaikwad, S. Singh, and A. Ajji, "Moisture absorbers for food packaging applications," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 609–628, 2019, doi: 10.1007/s10311-018-0810-z.
- [31] C. W. Chen et al., "Development of moisture-absorbing and antioxidant active packaging film based on poly(vinyl alcohol) incorporated with green tea extract and its effect on the quality of dried eel," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 42, no. 1, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1111/jfpp.13374.
- [32] S. B. Murmu and H. N. Mishra, "Selection of the best active modified atmosphere packaging with ethylene and moisture scavengers to maintain quality of guava during low-temperature storage," *Food Chem.*, vol. 253, no. January, pp. 55–62, 2018, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.01.134.
- [6] K. Vinay Pramod Kumar, J. W. Suneetha, C. K. Vinay Pramod Kumar, and B. Anila Kumari, "Active packaging systems in food packaging for enhanced shelf life," ~ 2044 ~ *J. Pharmacogn. Phytochem.*, vol. 7, no. 6, pp. 2044–2046, 2018.
- [7] M. W. Ahmed et al., "A review on active packaging for quality and safety of foods: Current trends, applications, prospects and challenges," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 33, no. July, p. 100913, 2022, doi: 10.1016/j.fpsl.2022.100913.
- [8] A. Dey and S. Neogi, "Oxygen scavengers for food packaging applications: A review," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 90, no. August 2018, pp. 26–34, 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.05.013.
- [9] K. Sadeghi, Y. Lee, and J. Seo, "Ethylene Scavenging Systems in Packaging of Fresh Produce: A Review," *Food Rev. Int.*, vol. 37, no. 2, pp. 155–176, 2021, doi: 10.1080/87559129.2019.1695836.
- [10] M. Qian et al., "Trends in Food Science & Technology A review of active packaging in bakery products: Applications and future trends," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 114, no. May, pp. 459–471, 2021, doi: 10.1016/j.tifs.2021.06.009.
- [11] G. Rux et al., "Humidity-Regulating Trays: Moisture Absorption Kinetics and Applications for Fresh Produce Packaging," no. Ivv, 2016, doi: 10.1007/s11947-015-1671-0.
- [12] D. S. Lee, H. J. Wang, C. Jaisan, and D. S. An, "Active food packaging to control carbon dioxide," *Packag. Technol. Sci.*, vol. 35, no. 3, pp. 213–227, 2022, doi: 10.1002/pts.2627.
- [13] M. T. Awulachew, "International Journal of Health Policy and Planning," vol. 1, no. 1, pp. 28–35, 2022.
- [14] B. Kuswandi and Jumina, *Active and intelligent packaging, safety, and quality controls*. Elsevier Inc., 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-816184-5.00012-4.
- [15] B. Demirhan and K. Candoğan, "Active packaging of chicken meats with modified atmosphere including oxygen scavengers," *Poult. Sci.*, vol. 96, no. 5, pp. 1394–1401, 2017, doi: 10.3382/ps/pew373.
- [16] E. Kütahneçi and Z. Ayhan, "Applications of different oxygen scavenging systems as an active packaging to improve freshness and shelf life of sliced bread," *J. fur Verbraucherschutz und Leb.*, vol. 16, no. 3, pp. 247–259, 2021, doi: 10.1007/s00003-021-01331-3.
- [17] Z. Kordjazi and A. Ajji, "Oxygen scavenging systems for food packaging applications: A review," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 100, no. 12, pp. 3444–3449, 2022, doi: 10.1002/cjce.24539.
- [18] A. S. Modaresi and R. Niazmand, "Characterization of Oxygen Scavenger Film Based on Sodium Ascorbate: Extending the Shelf Life of Peanuts," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 1184–1193, 2021, doi: 10.1007/s11947-021-02631-0.
- [19] 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, no. 3, pp. 682–688, 2018, doi: 10.1111/1750-3841.14061.
- [20] 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," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 24, no. February, p. 100488, 2020, doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100488.

- [37] J. Han, L. Zhang, B. Zhao, L. Qin, Y. Wang, and F. Xing, "The N-doped activated carbon derived from sugarcane bagasse for CO₂ adsorption," *Ind. Crops Prod.*, vol. 128, no. October 2018, pp. 290–297, 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.11.028.
- [38] J. Shin, E. J. Lee, and D. U. Ahn, "Electrospinning of tri-acetyl- β -cyclodextrin (TA- β -CD) functionalized low-density polyethylene to minimize sulfur odor volatile compounds," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 18, no. October, pp. 107–114, 2018, doi: 10.1016/j.fpsl.2018.10.005.
- [39] X. Yang, F. Yang, Y. Liu, J. Li, and H. Song, "Off-flavor removal from thermal-treated watermelon juice by adsorbent treatment with β -cyclodextrin, xanthan gum, carboxymethyl cellulose sodium, and sugar/acid," *Lwt*, vol. 131, no. January, p. 109775, 2020, doi: 10.1016/j.lwt.2020.109775.
- [40] B. Ghorani, R. Kadkhodae, G. Rajabzadeh, and N. Tucker, "Assembly of odour adsorbent nanofilters by incorporating cyclodextrin molecules into electrospun cellulose acetate webs," *React. Funct. Polym.*, vol. 134, no. September 2018, pp. 121–132, 2019, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2018.11.014.
- [33] S. M. Hertrich and B. A. Niemira, *Advanced Processing Techniques for Extending the Shelf Life of Foods*. 2021. doi: 10.1007/978-3-030-54375-4_5.
- [34] H. G. Lee, S. Jeong, and S. R. Yoo, "Development of food packaging materials containing calcium hydroxide and porous medium with carbon dioxide-adsorptive function," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 21, no. February, p. 100352, 2019, doi: 10.1016/j.fpsl.2019.100352.
- [35] H. G. Lee, C. H. Cho, H. K. Kim, and S. R. Yoo, "Improved physical and mechanical properties of food packaging films containing calcium hydroxide as a CO₂ adsorbent by stearic acid addition," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 26, no. March, p. 100558, 2020, doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100558.
- [36] H. J. Wang, D. S. An, J. W. Rhim, and D. S. Lee, "Shiitake mushroom packages tuned in active CO₂ and moisture absorption requirements," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 11, pp. 10–15, 2017, doi: 10.1016/j.fpsl.2016.11.002.