Scientific Journal of Packaging Science and Art
Vol. 13, No. 4, Winter 2023, Serial No. 52
ISSN: 2228-6675 , E-ISSN: 2980-7824

A Review on the Applications of Aerogels in Food Packaging

Najmeh Sohrabi, Hadi Almasi *

* Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(Received: 09/09/2022, Revised: 29/10/2022, Accepted: 07/01/2023, Published: 20/02/2023)

DOR: 20.1001.1.22286675.1401.13.52.6.1

ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate the chemical characteristics and review the applications of aerogels in food packaging. In this review article, the structure of aerogels is explained and the types of aerogels are classified. The polysaccharide and protein-based hydrogels and also organogels are used for the preparation of aerogels. The super critical drying and freeze drying are two common methods used for the production of aerogels which have been explained in this article. At the next step, different aspects of using aerogels in food packaging have been investigated. Aerogels have been used in creating thermal insulation in food packaging, absorbing food moisture, improving mechanical properties of the packaging system, and also loading bioactive compounds and indicators in the production of active and smart food packaging. The porous aerogel with thermal insulation properties is a great candidate for the substitution of expanded polystyrene in the packaging of hot restaurant foods. The mesoporous structure of the aerogel has made it a strong moisture super-absorbent leading to the growth of its application for packaging moisture sensitive foods. The incorporation of antimicrobial agents such as essential oils and nanoparticles and the preparation of active packaging are some other applications of aerogels in food packaging that have been explained in this review paper.

Keywords: Aerogel, Hydrogel, Freeze Drying, Thermal Insulation

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: h.almasi@urmia.ac.ir

نشریه علمی «علوم و فنون بسته‌بندی»
سال سیزدهم، شماره ۵۲، زمستان ۱۴۰۱؛ ص ۶۲-۴۹
شاپای چاپی: ۲۲۲۸-۶۶۷۵| شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۷۸۲۴
علمی – ترویجی

مروری بر کاربرد آئروژل‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی

نجمه سهرابی[۱]، هادی الماسی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1401.13.52.6.1

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

چکیده

هدف این مقاله بررسی خصوصیات شیمیایی و مرور موارد کاربرد آئروژل‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی است. در این مقاله مروری، به تشریح ساختار آئروژل‌ها پرداخته شده و انواع آئروژل‌ها طبقه‌بندی شده است. برای تولید آئروژل‌ها از هیدروژل‌های پلی ساکاریدی و پروتئینی و همچنین ارگانوژل‌ها استفاده می‌شود. خشک کردن فوق بحرانی و خشک کردن انجمادی متداول‌ترین روش‌های تولید آئروژل‌ها هستند که در این مقاله به آنها پرداخته شده است. در ادامه، به جنبه‌های مختلف کاربرد آئروژل‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی پرداخته شده است. از آئروژل‌ها در ایجاد عایق حرارتی در بسته‌بندی مواد غذایی، بهبود خصوصیات مکانیکی بسته‌بندی، جذب رطوبت ماده غذایی و همچنین بارگذاری ترکیبات زیست فعال و نشانگرها در تولید بسته‌بندی فعال و هوشمند مواد غذایی استفاده شده است. آئروژل متخلخل با عملکرد عایق حرارتی، جایگزینی مناسب برای پلی‌استایرن منبسط‌شده در بسته‌بندی محصولات غذایی گرم و رستورانی محسوب می‌شود. ماهیت متخلخل و منفذدار آئروژل آن را به یک سوپرجاذب قوی رطوبت تبدیل می‌کند که باعث توسعه کاربرد آن در بسته‌بندی مواد غذایی حساس به رطوبت شده است. افزودن ترکیبات ضدمیکروبی مانند اسانس‌ها و نانوذرات و تولید بسته‌بندی فعال از جمله کاربردهای دیگر آئروژل‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی است که در این مقاله مروری تشریح شده است.

کلیدواژه‌ها: آئروژل، هیدروژل، خشک کردن انجمادی، عایق حرارتی

۱- مقدمه

امروزه صنعت بسته‌بندی از اهمیت زیادی در فناوری تولید محصولات غذایی برخوردار است. پیشرفت جوامع و افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان در تأمین محصولات غذایی سالم و با کمترین میزان مخاطرات ایمنی، تولیدکنندگان را به سمت تولید محصولات سالم و با کمترین میزان استفاده از افزودنی‌ها و فرآیندهای مضر در مواد غذایی سوق داده است. درک اهمیت بسته‌بندی مواد غذایی از سوی تولیدکنندگان، باعث شده است که از پتانسیل‌های این فناوری در ارتقاء کیفیت محصولات غذایی استفاده مؤثری به عمل آید [۱]. در طی دو دهه اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی صورت گرفته است و هدف از بسته‌بندی به فراتر از انتظارات ابتدایی از یک بسته‌بندی معمولی مواد غذایی ارتقا یافته است. امروزه استفاده از فناوری‌های نوین در بسته‌بندی مواد غذایی، چشم‌انداز جدید و افق روشنی را پیش روی این حوزه از صنایع غذایی قرار داده است. استفاده از فناوری‌های پیشرفته در بسته‌بندی مواد غذایی با هدف پاسخ به چالش‌های مهم در این حوزه مورد توجه قرار می‌گیرد. چالش‌هایی نظیر حفظ کیفیت بیشتر و مؤثرتر، افزایش ماندگاری و انبارمانی مواد غذایی، تأمین ایمنی و کاهش آلاینده‌ها، سهولت تشخیص جعل و دست‌کاری و مواردی از این قبیل، اهداف طراحی بسته‌بندی‌های نوین در صنایع غذایی بوده است و پیشرفت‌های قابل توجهی نیز در این عرصه صورت گرفته است. یکی از پیشرفت‌های اخیر در طراحی بسته‌بندی‌های نوین، ورود آئروژل‌ها به این حوزه است. استفاده از آئروژل‌ها در طراحی بسته‌بندی‌های نوین مواد غذایی مبحث جدیدی محسوب می‌شود و مطالعات در این زمینه سابقه طولانی ندارد. در این مقاله مروری، به تعریف آئروژل‌ها پرداخته شده و روش‌های تولید آن‌ها مورد اشاره قرار می‌گیرد. همچنین زمینه‌های کاربرد آئروژل‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی مورد بررسی قرار گرفته و به جدیدترین یافته‌ها در این زمینه اشاره شده است.

۲- آئروژل‌ها و خصوصیات کاربردی آن‌ها

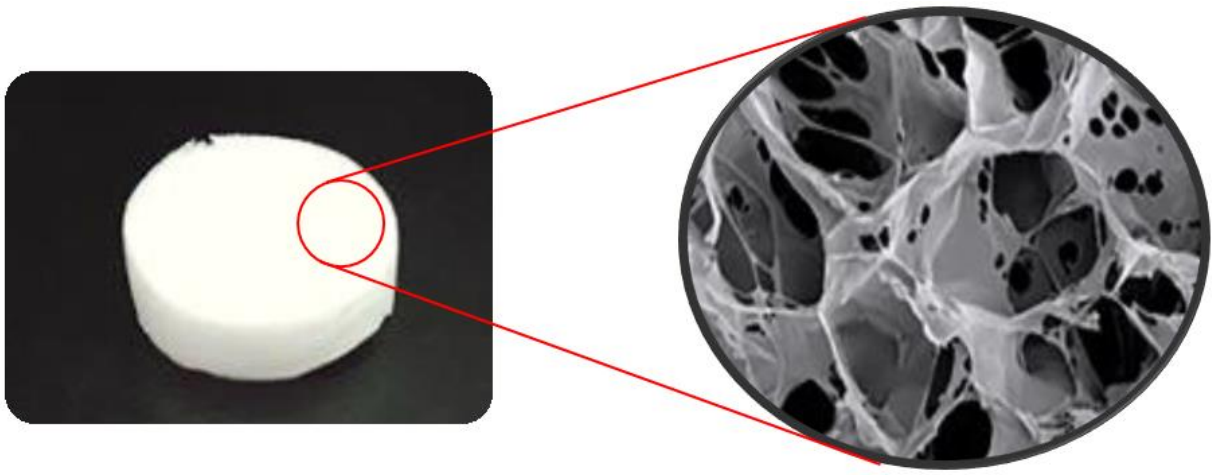
آئروژل[۱] نوعی ماده جامد متخلخل با تراکم کم و سطح ویژه زیاد است که اولین بار در سال ۱۹۳۱ با جایگزینی مایع درون ژل با گاز از طریق افزایش دما و به‌کارگیری فشار در بالاتر از نقطه

[1] Aerogel

* رایانامه نویسنده مسئول: h.almasi@urmia.ac.ir

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.
ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع) © نویسندگان

بحرانی حلال توسط شخصی بنام Steven Klister تهیه شد. این کار از تبخیر مستقیم حلال جلوگیری کرده و باعث می‌شود که از چروکیده شدن ساختار تشکیل‌شده جلوگیری گردد. بر اساس مطالعات اخیر، تعریف آئروژل‌ها عبارت است از هر ماده متخلخل مشتق شده از سل- ژل‌ها که دارای دانسیته کم و مزوپور هستند یعنی قطر منافذ آن‌ها در محدوده ۵۰-۲۲ نانومتر قرار دارد. شکل ظاهری یک آئروژل و میکروساختار متخلخل آن در شکل (۱) نشان داده شده است. بر اساس منبع پیش‌ساز، آئروژل‌ها به دو دسته آلی و غیرآلی تقسیم‌بندی می‌شوند. از جمله مواد غیرآلی که به‌طور گسترده برای تهیه آئروژل‌ها استفاده می‌شود عبارت‌اند از تیتانیا، آلومینیا، زیرکونیا، خاک رس و سایر اکسیدها. اما به‌دلیل شکنندگی ذاتی آئروژل‌های غیرآلی در طی خشک کردن، کاربرد آن‌ها محدود شده است. امروزه بیوپلیمرها به علت مقاومت ذاتی بالا و زیست تجزیه‌پذیری آن‌ها پیش‌سازهای خوبی برای تهیه آئروژل‌ها به شمار می‌روند [۲].



شکل (۱): شکل ظاهری یک آئروژل و ریزساختار متخلخل آن با شبکه منفذدار منظم

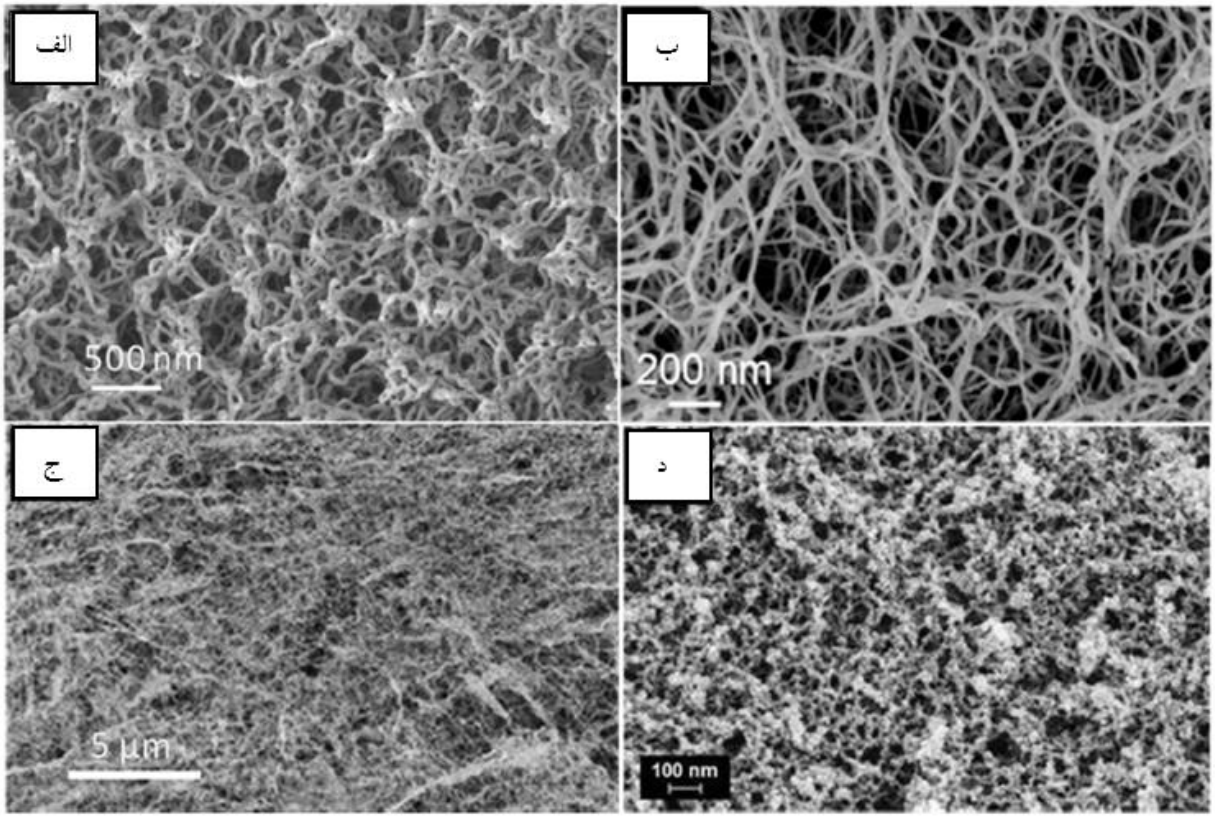
آئروژل‌ها به‌عنوان نوع خاصی از مواد نانوساختار تعریف می‌شوند که ویژگی‌های فیزیکی خاصی دارند و با حذف مایع موجود در منافذ ژل به‌دست می‌آیند [۳]. خصوصیاتی مانند جامد بودن، چگالی ظاهری کم و تخلخل باز (عمدتاً در محدوده مزوپور) به‌عنوان خواص فیزیکی ویژه‌ای محسوب می‌شوند که ماده بایستی آن‌ها را داشته باشد تا در تعریف آئروژل قرار گیرد. شبکه‌های آئروژل از ذرات به هم پیوسته یا الیاف نانومتری تشکیل شده‌اند که به‌صورت تصادفی اما منظم به یکدیگر متصل شده و منجر به ایجاد تخلخل بالا (معمولاً در محدوده ۹۹/۹۹-۹۵ درصد) و سطح ویژه بسیار بالا (۱۵۰ متر مربع بر گرم و بالاتر) می‌شود. شکل ۲ ریزساختار چند نوع آئروژل تولیدشده را نشان می‌دهد و ساختار متخلخل در همه تصاویر کاملاً مشهود است. چنین ساختاری دارای خواص منحصربه‌فردی است. عایق صوتی و حرارتی است و ظرفیت بارگذاری مواد بسیار بالایی دارد و این خواص باعث می‌شود آئروژل در بسیاری از زمینه‌های صنعتی مانند هوا فضا، ساختمان، پتروشیمی و... مورد بهره‌برداری قرار گیرد. در سال‌های اخیر استفاده از این نانوساختار برای کاربردهای زیست‌محیطی و زیست پزشکی و همچنین بسته‌بندی مواد غذایی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است [۶-۴].

آئروژل‌ها با استخراج حلال از ژل‌های مرطوب (هیدروژل‌ها[1] یا ارگانوژل‌ها[2]) به‌دست می‌آیند. بدین منظور از روش‌هایی استفاده می‌شود که امکان حفظ ساختار شبکه جامد آئروژل را فراهم می‌کند. خشک کردن با کمک دی اکسید کربن فوق بحرانی بهترین روش محسوب می‌شود (شکل ۲- الف و ب). سایر روش‌های خشک کردن، مانند خشک کردن در دمای محیط یا خشک کردن انجمادی نیز می‌توانند در موارد خاص به ایجاد ساختارهای آئروژل منجر شوند (شکل ۲- ج و د). در روش خشک کردن در دمای محیط، به‌دلیل احتمال چروکیدگی ساختار، عملکرد سطح ژل‌ها عمدتاً با ترکیبات سیلان اصلاح می‌شود و به دنبال آن استفاده متوالی از حلال‌های با کشش سطحی کم (هگزان، پنتان، اتانول، استون) می‌تواند به جلوگیری از انقباض یا ترک خوردن ژل کمک کند [۷].

بیشتر آئروژل‌ها بر پایه پلیمرهای غیرآلی یا سنتزی تولید شده‌اند و اغلب از سیلیس، اکسیدهای فلزی یا پلی‌استایرن برای ساخت آن‌ها ساخته می‌شود [۹،۸]. با این حال، طبق نظر محققان مختلف [۱۲-۱۰] همه بیوپلیمرها گزینه‌های بالقوه مناسبی برای تشکیل آئروژل‌ها هستند. آئروژل‌های مبتنی بر

[1] Hydrogels
[2] Organogels

بیوپلیمرها، از جمله پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها علاوه بر خصوصیات فیزیکی مطلوب، دارای ارزش غذایی نیز هستند [۱۵-۱۳]. این منابع جدید آئروژل به‌دلیل سازگاری با رژیم غذایی انسان، عدم وجود اثرات نامطلوب بر سلامت و همچنین ایجاد خواص فیزیکی مطلوب، فرصت‌های جدیدی را برای کاربردهای غذایی فراهم کرده‌اند. آئروژل‌ها می‌توانند به‌عنوان سیستم انتقال مواد مغذی، مکمل‌های غذایی، طعم‌دهنده‌ها و سایر افزودنی‌ها و یا به‌عنوان اجزای هوشمند برای بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرند. آئروژل‌ها می‌توانند به‌عنوان حامل ترکیبات مفید غذایی طراحی شوند و پایداری مواد حمل شده را افزایش دهند، بوی آن را بپوشانند و پس از مصرف اجازه انتشار کنترل‌شده یا تحریک‌شده توسط pH را بدهند [۱۸-۱۶].



شکل (۲): تصویر SEM از ریزساختارهای آئروژل (الف) آلژینات و (ب) پکتین به‌دست آمده با روش خشک کردن سیال فوق بحرانی، (ج) آئروژل‌های سلولز حاصل از روش خشک کردن انجمادی و (د) آئروژل‌های کامپوزیت سیلیس- سلولز با روش خشک کردن در دمای محیط [۱۹].

۳- انواع مواد مورداستفاده در تولید آئروژل‌ها

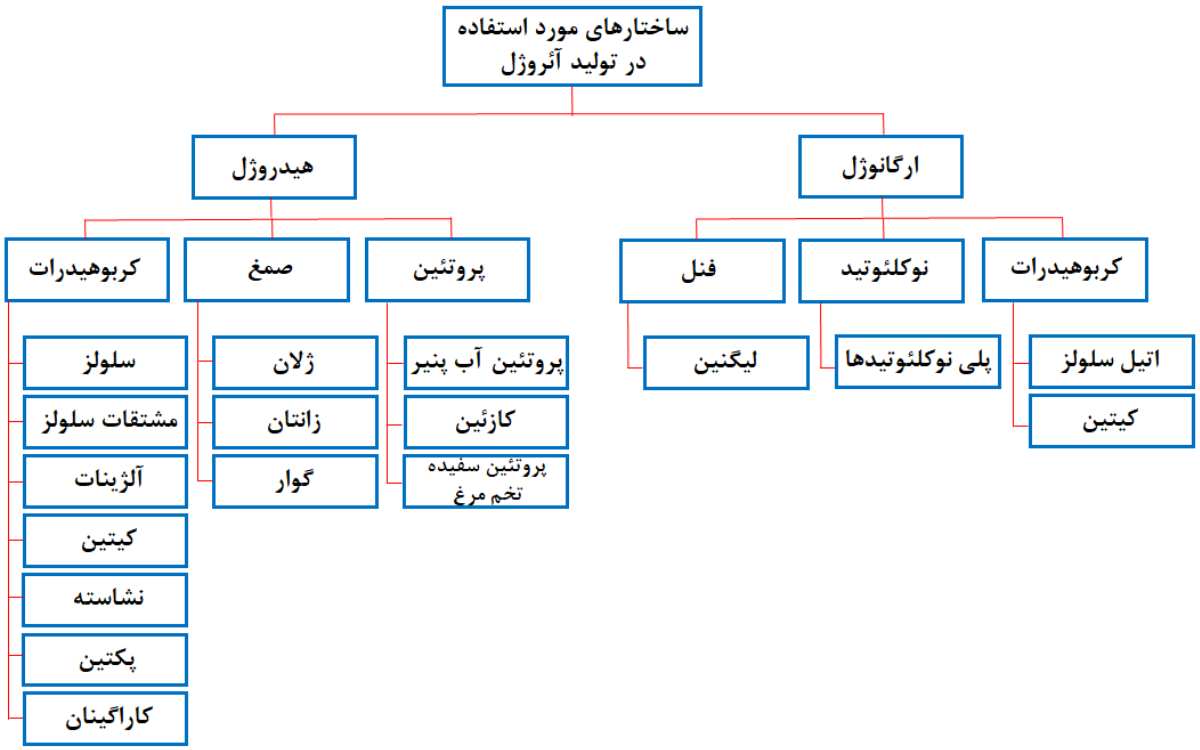
تولید آئروژل تقریباً از هر ماده زیستی که قادر به تشکیل یک شبکه پلیمری سه‌بعدی است امکان‌پذیر است. کاربردهای زیست‌پزشکی و زیست‌محیطی آئروژل‌ها دو مسیر مهم جریان پژوهش‌های بین‌المللی در حوزه آئروژل‌ها هستند. در مقابل، تحقیقات بر روی آئروژل‌ها با هدف کاربردهای غذایی هنوز در مراحل اولیه خود است و پتانسیل کامل آن‌ها بایستی مورد ارزیابی بیشتر قرار گیرد. هیدروژل‌ها و ارگانوژل‌ها دو دسته مهم مواد مورداستفاده در تهیه آئروژل‌ها هستند. در هر کدام از این دسته‌ها، انواع مختلف مواد زیستی قرار دادند که می‌توانند برای تولید آئروژل مورد استفاده قرار گیرند. انواع موادی که قابلیت استفاده در تولید آئروژل‌ها را دارند در شکل (۳) طبقه‌بندی شده‌اند. در ادامه، مواد اصلی زیستی که می‌توانند در تهیه آئروژل‌ها برای کاربردهای غذایی مورد استفاده قرار گیرند، مورد بحث قرار می‌گیرند.

۳-۱- هیدروژل‌ها

۳-۱-۱- هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی

در حال حاضر، اکثر آئروژل‌های زیستی از هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی به‌دست می‌آیند (شکل ۳). در این راستا، کاربردهای هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی برای تولید آئروژل توسط محققان مختلف مورد بحث قرار گرفته است [۲۰،۱۴ و ۲۱]. با

این وجود، کاربردهای مربوط به بخش مواد غذایی محدود بوده و عمدتاً مربوط به استفاده از سلولز و نشاسته است [۲۴-۲۲]. علاوه بر آن‌ها، پلی‌ساکاریدهای دیگری که به‌طور مرسوم به‌عنوان غلیظ کننده مواد غذایی یا فیبر رژیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای پتانسیل شبکه‌سازی و ایجاد ژل‌هایی هستند که می‌توانند به آئروژل تبدیل شوند. همی‌سلولزها [۲۸-۲۵]، پکتین [۲۹]، آلژینات‌ها [۳۲-۳۰]، صمغ زانتان [۳۳] و کاراگینان [۳۴] از جمله پلی‌ساکاریدهایی هستند که کارایی آن‌ها در تولید آئروژل‌ها مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است.



شکل (۳): انواع ساختارهای مورداستفاده در تولید آئروژل‌ها و ترکیبات طبیعی زیرمجموعه هر ساختار [۱۹].

۳-۱-۲- هیدروژل‌های پروتئینی

پروتئین‌های مختلفی برای تولید آئروژل‌های هیدروژلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ژلاتین و کلاژن از جمله پروتئین‌های مورد مطالعه برای آماده‌سازی آئروژل هستند که نه تنها به‌عنوان انتقال‌دهنده‌های دارویی بلکه در علم پزشکی مانند جراحی پلاستیک نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۶، ۳۸-۳۵]. در مقابل، تحقیقات انجام‌شده در زمینه آئروژل‌های پروتئینی برای کاربردهای غذایی اساساً بر پروتئین‌های لبنی و سفیده تخم مرغ تمرکز دارد [۴۱-۳۹]. پروتئین‌ها همچنین در ترکیب با بیوپلیمرهای دیگر برای شکل‌دهی به ساختمان داخلی آئروژل‌های کامپوزیتی استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال، نشان داده شده است که پروتئین‌های سویا برای کنترل انتقال از ساختار فیبریلاری به ساختار شبکه‌ای در آئروژل‌های کامپوزیتی پروتئین - سلولز مناسب هستند [۴۲]، در حالی که زئین ذرت به‌عنوان یک بیوپلیمر برای ایجاد منافذ بزرگ در آئروژل‌های نشاسته‌ای منسجم پیشنهاد شده است [۴۳].

۳-۱-۳- سایر هیدروژل‌ها

اخیراً نشان داده شده است که نه تنها بیوپلیمرها با استفاده از پلی‌ساکاریدها یا آمینواسیدها می‌توانند ژل ایجاد کنند، بلکه آن‌هایی که از ترکیبات پلی فنلیک مانند لیگنین ساخته شده‌اند نیز می‌توانند در صورت ایجاد پیوندهای متقابل، ژل تولید کنند [۴۴]. علاوه بر این، به نظر می‌رسد پلی‌نوکلئوتیدها اجزای مناسب برای ساخت هیدروژل با خواص مکانیکی قابل تنظیم باشند [۴۵]. دلیل این امر آن است که شبکه ژل با پیوند کووالانسی تثبیت می‌شود نه با انرژی کم و برهمکنش‌های معمول. بنابراین هر ماده دارای وزن مولکولی بالا که در حالت هیدروژل قادر به تشکیل این نوع پیوند باشد می‌تواند در تولید آئروژل مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲- ارگانوژل‌ها

علیرغم تعداد بالای پژوهش‌ها در زمینه تهیه آئروژل از هیدروژل‌ها، اطلاعات در مورد امکان به‌دست آوردن آئروژل از

ارگانوژل‌ها تقریباً وجود ندارد. ارگانوژل را می‌توان به‌عنوان شبکه‌های سه بعدی تعریف کرد که یک مایع آلی را به دام می‌اندازند [۴۸-۴۶]. در بخش مواد غذایی، این مایع ارگانیک اغلب روغن است و به همین به‌دلیل از اصطلاحی معادل ارگانوژل به نام اولئوژل[1] نیز استفاده می‌شود. بیشتر اولئوژلاتورها ترکیباتی با وزن مولکولی کم هستند که خود به خود جمع شده و ارگانوژل‌های برگشت‌پذیر حرارتی را تشکیل می‌دهند که این روش احتمالاً برای تولید آئروژل نامناسب است. با این حال، اخیراً نشان داده شده است که حتی بیوپلیمرهای در ابعاد بزرگ را می‌توان برای ژل‌سازی ارگانوژل استفاده کرد. نمونه‌هایی از بیوپلیمرهایی که قادر به شبکه‌سازی در روغن هستند عبارت‌اند از اتیل سلولز مشتق شده از سلولز، الیاف کیتین آبگریز و امولسیون‌ها یا فوم‌های پروتئینی در حلال غیرآبی [۵۴-۴۹]. حذف حلال از این اولئوژل‌ها (ارگانوژل‌ها) می‌تواند برای تبدیل آن‌ها به آئروژل‌های بسیار چربی دوست، با ویژگی‌های منحصر به فرد مانند قابلیت جذب روغن اعمال شود. امکان تولید آئروژل‌های آبگریز از اولئوژل‌ها اخیراً مورد بررسی قرار گرفته است که به ساختار موجود اجازه می‌دهد ۰/۶ گرم روغن را در هر گرم آئروژل به دام بیندازد [۵۵].

۴- روش‌های تهیه آئروژل‌ها

تاکنون دو روش رایج برای خشک کردن هیدروژل و تهیه آئروژل پیشنهاد شده است. خشک کردن فوق بحرانی کارآمدترین روش برای ایجاد منافذ ریز در بافت آئروژل است. این روش خشک کردن نیاز به فشار بالا دارد و در نتیجه روشی خطرناک و پرهزینه است و فرآیند تولید تجاری آن در مقیاس بزرگ نیز آسان نمی‌باشد. در مقابل، خشک کردن به روش انجمادی روشی ساده، مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست است، کارکرد آسان دارد و تولید در مقیاس بزرگ امکان‌پذیر است. با این حال، فرایند خشک شدن آن طولانی است. در ادامه به جزئیات این دو روش تولید آئروژل اشاره می‌شود. از آنجایی که خشک کردن در شرایط اتمسفری به ندرت استفاده می شود [۵۶]، در این بررسی این روش مورد بحث قرار نخواهد گرفت.

۴-۱- خشک کردن فوق بحرانی

فرآیند روش خشک کردن فوق بحرانی را می‌توان به دو رویکرد خشک کردن فوق بحرانی با دمای بالا[2] (HTSCD) و خشک کردن فوق بحرانی با دمای پایین[3] (LTSCD) طبقه‌بندی کرد. در خشک کردن فوق بحرانی با دمای بالا، آب موجود در هیدروژل باید با یک حلال آلی (الکل، استون) جایگزین شود و سپس تحت حرارت و فشار در اتوکلاو قرار گیرد. حلال موجود در ژل‌ها به حالت فوق بحرانی می رسد و سپس در دمای ثابت خارج می شود. در روش خشک کردن فوق بحرانی با دمای پایین از CO_2 مایع به‌عنوان یک محیط خشک‌کننده برای جایگزینی حلال آلی (الکل، استون) در ژل استفاده می‌شود و می‌تواند در دمای بحرانی نزدیک به دمای اتاق به CO_2 فوق بحرانی تبدیل شده و به دنبال آن آئروژل تشکیل شود. با این حال، خشک کردن فوق بحرانی می تواند فشار مویین را حذف و شکل اصلی مواد را حفظ کند، زیرا فشار و دما را می‌توان برای رسیدن به نقطه بحرانی که در آن گاز و مایع با چگالی یکسان وجود داشته داشته و مرز ناحیه انتقال فاز ناپدید شود کنترل نمود [۵۷]. این روش خشک کردن هیدروژل این مزیت را دارد که می‌توان از افزایش کشش سطحی در منافذ جهت حفظ ساختار منافذ آئروژل‌ها جلوگیری کرد. در فرآیند تبدیل ژل به آئروژل در خشک کردن فوق بحرانی، فاز آبی هیدروژل با هدف کاهش کشش سطحی و در نتیجه حذف فشار مویین برای جلوگیری از فروپاشی منافذ، با اتانول جایگزین می‌شود [۵۸]. یافتن سیال فوق بحرانی مناسب و ایمن به‌عنوان یک چالش در کارهای تحقیقاتی قبلی در نظر گرفته شده است تا اینکه CO_2 مایع به‌عنوان یک محیط خشک‌کننده به‌دلیل ایمنی نسبی بالا، دمای پایین (۳۱ درجه سانتی‌گراد) و فشار ملایم (۷۴ بار) در طول فرآیند آماده سازی در صنعت استفاده شده است و امروزه نیز کاربرد دارد. پس از جایگزینی اتانول (در فرآیند تهیه الکوژل[4])، استخراج فوق بحرانی اتانول به کمک مایعات فوق بحرانی (مانند CO_2، CH_4) انجام شده و سپس آئروژل‌های به‌دست آمده، جمع‌آوری شدند. با افزایش محتوای اتانول میزان تخلخل، چگالی و همچنین مساحت سطح افزایش یافت [۵۹]. مشخص شد که افزایش سرعت جریان بیش از حد استخراج اتانول باعث افزایش سرعت انتشار اتانول بین منافذ می‌شود. این امر منجر به ترک‌خوردگی بیشتر در ساختار داخلی ژل می شود که برای تشکیل سطح مقطع مطلوب در آئروژل ها مناسب نیست.

در خصوص تأثیر زمان خشک کردن، گارسیا - گونزالس و همکاران [۶۰] نشان دادند که ارتباطی بین چگالی آئروژل‌های نشاسته‌ای با زمان خشک شدن وجود دارد و با افزایش زمان خشک کردن چگالی کاهش می‌یابد. علاوه بر اثر روی چگالی، به‌دلیل مزایای اقتصادی، زمان خشک شدن باید به‌صورت بهینه کنترل شود. در مورد اثر فشار خشک کردن در روش سیال فوق بحرانی نیز مشخص شد که افزایش فشار خشک کردن به کاهش

[1] Oleogel
[2] High Temperature Super Critical Drying
[3] Low Temperature Super Critical Drying
[4] Alcohogel

سطح مقطع آئروژل‌ها و افزایش چگالی کمک می‌کند. گزارش شده است که فشار بالا آئروژل‌هایی با منافذ کوچک تولید می‌کند و کاهش فشار بر رشد منافذ تأثیر می‌گذارد و منجر به تشکیل منافذ بزرگ‌تر می‌شود [۶۱].

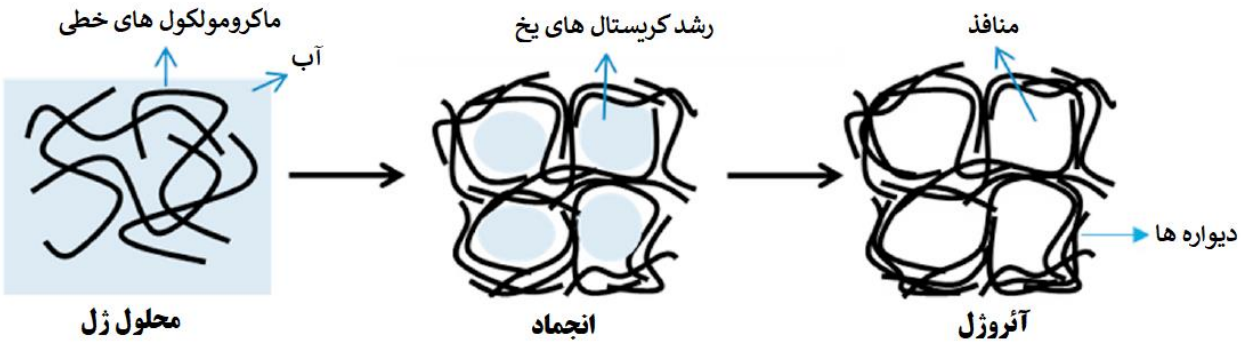
بایستی به این نکته توجه داشت که نوع ماده مورد استفاده نیز بر روی خصوصیات فیزیکی آئروژل تولید شده به روش خشک کردن با سیال فوق بحرانی مؤثر خواهد بود. جدول (۱) یک مقایسه بین ریزساختار و خواص فیزیکی انواع مختلف آئروژل‌های مبتنی بر پلی ساکارید و تولید شده با روش خشک کردن فوق بحرانی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت که توزیع اندازه منافذ در محدوده سطح نانو قرار دارد. چگالی کم و تخلخل بالا نیز از جمله مشخصه‌های اصلی آئروژل‌های حاصل از روش خشک کردن با سیال فوق بحرانی محسوب می‌شوند.

جدول (۱): خواص فیزیکی انواع مختلف آئروژل‌های مبتنی بر پلی ساکارید [۶۲]

نمونه	چگالی (گرم/سانتی‌مترمکعب)	سطح مقطع (مترمربع/گرم)	اندازه منافذ (نانومتر)	تخلخل (درصد)
آئروژل پکتین	۰/۰۵ – ۰/۰۴	۳۵۰ – ۲۷۰	-	-
آئروژل‌های بتا گلوکان جو و مخمر	۰/۱۲ – ۰/۰۳	۱۷۳/۱ – ۸۹/۴	۱۶/۱ – ۲۳/۹	-
آئروژل آلژینات	۰/۱۷ – ۰/۱۵	۱۷۳/۳ – ۱۲۶/۹	۱۷/۳۴ – ۱۵/۴۸	-
آئروژل نانوذرات نقره/نانوالیاف سلولز	۰/۲۱	۳۱/۵		۹۸/۶
آئروژل های نانو سلولزی	-	۳۵۳/۸۳ – ۲۶۰/۸۷	۹/۳۸ – ۷/۸۱	-
آئروژل‌های نشاسته‌ای	-	۹۳	۲۵ - ۲۴	۸۷/۷
آئروژل کیتوزان	-	۴۷۹-۲۵۷	۱۵/۰ – ۱۲/۶	۹۶/۸
آئروژل تنگستن/آلژینات	-	۳۸۱	۳۱	۹۶
کیتوزان/ آئروژل هیدروکسید لانتانیم	-	۱۷۲/۷۴	۱۹/۷۹	-

۴-۲- خشک کردن انجمادی

به‌دلیل هزینه کم و ایمنی بالا، تمایل به استفاده از خشک کردن به روش انجمادی برای آماده‌سازی آئروژل بسیار افزایش یافته است. روش کار به این صورت است که ابتدا سل ژل منجمد می‌شود و سپس ژل منجمد شده، تصعید می‌شود که در طی آن مایع موجود در ژل با گاز جایگزین می‌شود تا منافذی را تحت خلأ زیاد ایجاد کند [۶۲ و ۶۳]. ساختار آئروژل‌ها با فرآیند رشد بلورهای ژل منجمد شده شکل می‌گیرد. شکل (۴) شماتیک تشکیل آئروژل‌ها به روش خشک کردن انجمادی را نشان می‌دهد. نی و همکاران [۶۳] با استفاده از میکروسکوپ پلاریزه دما پایین، فرآیند رشد کریستال یخ را با شرایط دمایی و غلظت مواد مختلف بررسی کردند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری و توزیع اندازه منافذ نشان می‌دهد که دما و غلظت مواد در روش خشک کردن انجمادی می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر رشد کریستال یخ و همچنین ساختار منافذ آئروژل تأثیر بگذارند. تحت شرایط مختلف خشک کردن به روش انجمادی، می‌توان اندازه منافذ آئروژل را تنظیم کرد. مثال‌هایی در این خصوص در جدول (۲) خلاصه شده است.



شکل (۴): شماتیک تشکیل آئروژل به روش خشک کردن انجمادی [۶۴]

جدول (۲): اندازه منافذ آئروژل‌های مبتنی بر پلی ساکارید در شرایط مختلف روش خشک کردن انجمادی [۶۲]

نوع آئروژل	اندازه منافذ (نانومتر)	دمای انجماد (درجه سانتی‌گراد)	فشار انجماد (پاسکال)	غلظت (درصد وزنی)
آئروژل سلولز نانوفیبریل شده	۲ - ۵۰	(مملو از نیتروژن مایع) - ۱۹۶	< ۵	۰/۱
آئروژل سلولزی	۲۰ - ۶۰۰	- ۸۰	۲۰	۰/۲
آئروژل سلولز نانوفیبریل شده	۷۴/۳ – ۵۰/۶	(نیتروژن مایع) - ۱۹۶	< ۲۰	۰/۳
آئروژل سلولز نانوفیبریل شده	۶۸/۱ – ۴۷/۳	(یخ خشک) - ۵۵	< ۲۰	۰/۳
آئروژل پکتین	۱۹/۲ – ۱۱/۸	(انجماد معمولی) - ۱۸	-	-

۵- کاربرد آئروژل‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی

بسته‌بندی مواد غذایی دارای اهداف متعددی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از محافظت از محصول بسته‌بندی‌شده در برابر فشارهای مکانیکی، گازها و بخارات، رطوبت، نور، دما، میکروب‌ها و آلودگی. مواد بسته‌بندی بر اساس ظرفیت آن‌ها و همچنین با در نظر گرفتن سایر عملکردهایی که یک ماده بسته‌بندی ممکن است انجام دهد، از جمله سهولت حمل و نقل، مصرف راحت محصول و ارائه اطلاعات به مصرف‌کنندگان برای محافظت از محصول غذایی انتخاب می‌شوند. مواد بسته‌بندی به‌گونه‌ای می‌توانند در بسته‌بندی اولیه محصول قرار گیرند که اطلاعاتی در مورد کیفیت و ماندگاری محصول ارائه دهند که در این حالت به آن بسته‌بندی هوشمند[1] گفته می‌شود و یا برای افزایش ماندگاری محصول، ترکیبات مفید آزاد کنند یا ترکیبات مضر را جذب نمایند که در این حالت به آن بسته‌بندی فعال[2] اطلاق می‌شود [۶۵].

یکی از جنبه‌های کاربرد آئروژل‌ها در صنعت غذا، استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی است. مهم‌ترین و منحصر به فردترین ویژگی آئروژل‌ها جهت استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی، ساختار متخلخل آن‌هاست که منجر به ایجاد وزن کم و سطح مقطع ویژه بالا می‌شود. این ویژگی، زمینه را برای حفاظت مکانیکی و ایجاد عایق حرارتی فراهم می‌کند. همچنین به‌دلیل ظرفیت بارگذاری بالای ترکیبات مهمان در چنین ساختار متخلخلی، امکان ایجاد بسته‌بندی فعال بر پایه آئروژل‌ها با قابلیت جذب یا آزادسازی ترکیبات خاص فراهم می‌شود. تخلخل و آبدوستی بالا، آئروژل‌ها را به یک جاذب مناسب آب نیز تبدیل می‌کند که می‌تواند در بسته‌بندی مواد غذایی مناسب باشد. جنبه‌های مختلف کاربرد آئروژل‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱- محافظت در برابر فشارهای مکانیکی

خواص مکانیکی آئروژل‌ها تحت تأثیر مورفولوژی متخلخل آن‌ها قرار دارد. قدرت مکانیکی یک آئروژل، هدف کاربرد آن در بسته‌بندی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. منظور از میزان قدرت آئروژل، وزنی است که یک آئروژل می‌تواند روی خود تحمل کند. به‌عنوان مثال، یک تکه مربعی شکل آئروژل بر پایه کیتین با وزن ۶۰ میلی‌گرم و با حجم ظاهری حدود ۵/۶ سانتی‌متر مکعب، در برابر یک جسم ۱۰۰ گرمی بدون هیچ‌گونه خمیدگی و تغییر شکل مقاومت می‌کند [۶۶]. آئروژل‌ها می‌توانند به‌عنوان یک محافظ کارآمد از مواد غذایی بسته‌بندی‌شده در برابر فشارهای مکانیکی که ممکن است در حین حمل و نقل یا جابجایی وارد شود، عمل کنند. از طرف دیگر این نکته حائز اهمیت است که رطوبت می‌تواند خواص مواد را تغییر دهد به‌ویژه موادی که از پلیمرهای زیستی به‌دست می‌آیند. اما آئروژل‌ها به کمک انجماد در نیتروژن مایع، پایداری از نظر ابعادی به‌دست می‌آورند که می‌توانند اشکال و اندازه‌های هندسی خود را در زمان قرارگیری در محیط‌های مرطوب حفظ کنند [۶۷]. این ویژگی می‌تواند برای موادی که در تماس با بسیاری از مواد غذایی مرطوب قرار دارند، کارآمد و مفید باشد بدون اینکه در مقاومت مکانیکی آن‌ها تغییری ایجاد شود.

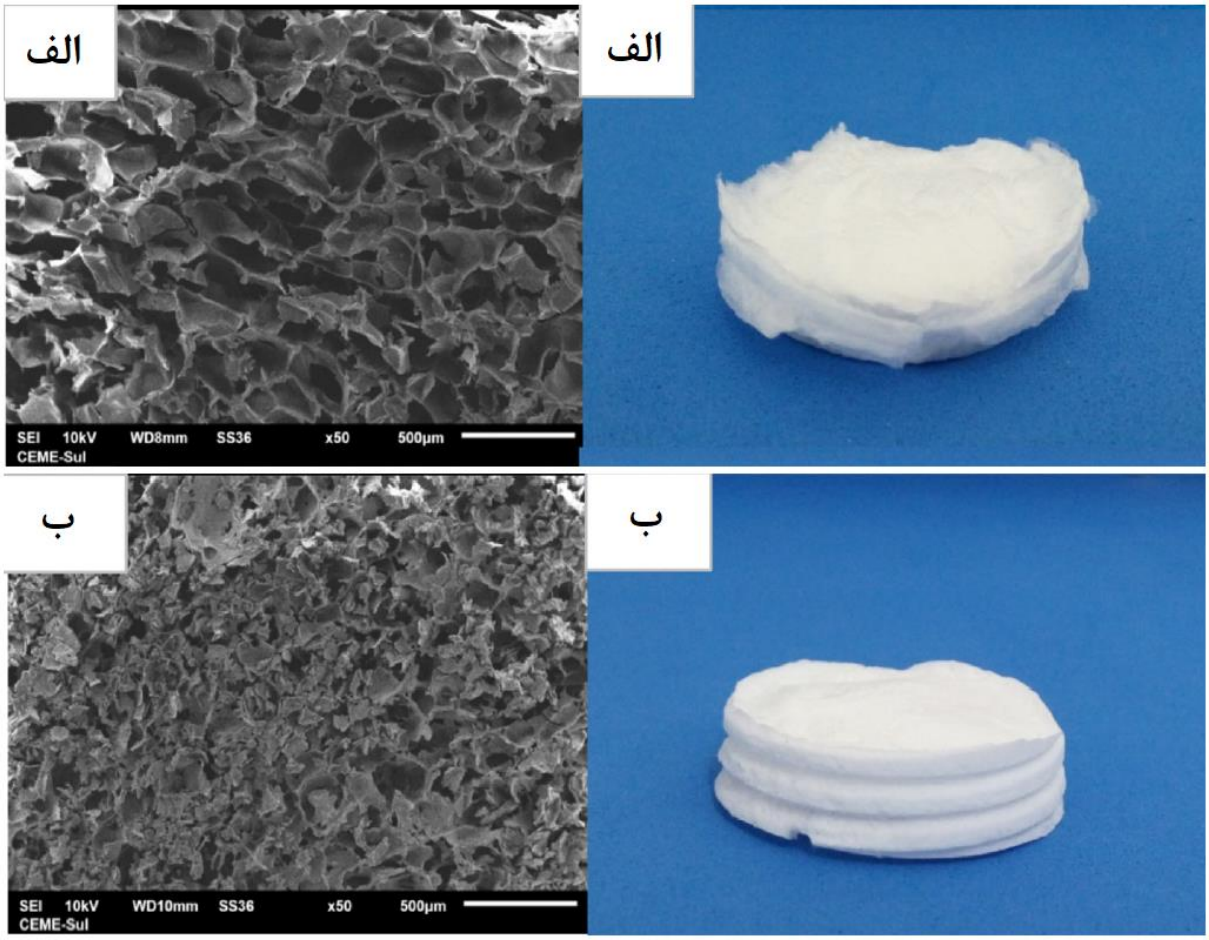
۵-۲- استفاده به‌عنوان سوپرجاذب آب[3]

یکی دیگر از خصوصیات فیزیکی مهم آئروژل‌ها، قدرت جذب آب بسیار بالای آن‌هاست که از ماهیت متخلخل و منفذدار آن نشأت می‌گیرد. این ویژگی در بسته‌بندی محصولات غذایی که به رطوبت حساس هستند و حذف آب از محیط در حفظ کیفیت آن‌ها اهمیت دارد، بسیار مورد توجه است. به‌عنوان مثال تولید خونابه در داخل بسته‌بندی فرآورده‌های گوشتی مانند آلایش‌های مرغ و ماهی اهمیت زیادی دارد و علاوه بر کاهش کیفیت ظاهری محصول می‌تواند به افزایش آلودگی و رشد میکروبی و کاهش ماندگاری محصول نیز منجر شود. در خصوص این دسته از مواد غذایی، استفاده از جاذب‌های رطوبت به شکل پد یا انواع مختلف

[1] Smart packaging
[2] Active packaging
[3] Water Super Absorber

شکل‌های بسته‌بندی، با جذب رطوبت محیط می‌تواند به حفظ کیفیت محصول کمک کند.

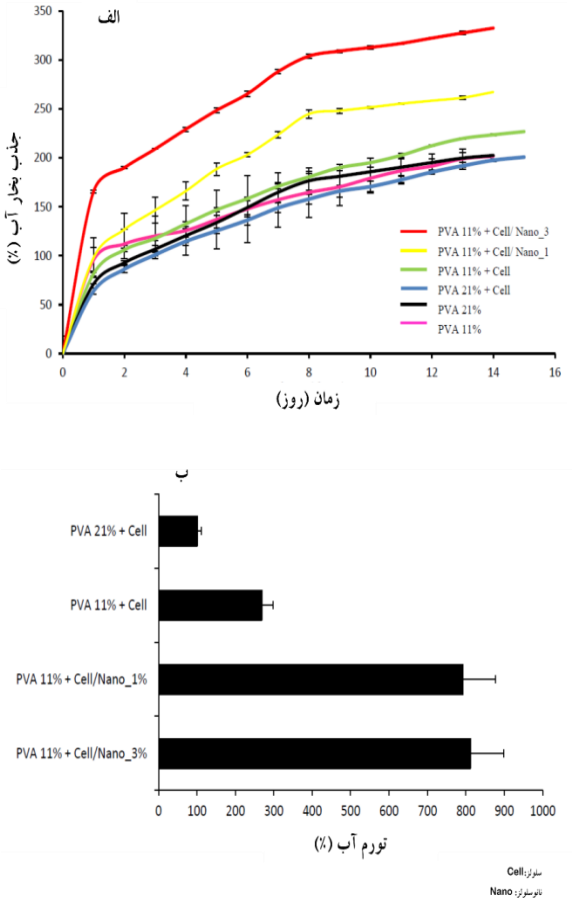
خاصیت جاذب الرطوبه بودن آئروژل‌ها آن‌ها را به سوپرجاذب قوی رطوبت تبدیل می‌کند و زمینه را برای استفاده از آن‌ها در جذب رطوبت داخل بسته‌بندی مواد غذایی مساعد می‌کند. دی اولیویرا و همکاران [۶۷] از سبوس برنج و یولاف نانوکریستال سلولز تولید کردند و از آن‌ها برای تولید آئروژل استفاده کردند. هر دو نوع آئروژل دارای مورفولوژی متخلخل یکنواخت بودند و قدرت جذب رطوبت آن‌ها بین ۲۶۴ تا ۴۰۲ درصد گزارش شد. این قدرت بالای جذب رطوبت کارایی آئروژل‌های تولیدشده را در جذب رطوبت به اثبات رساند. در یک مطالعه دیگر، داسیلوا و همکاران [۶۸] از ترکیب نشاسته گندم و پلی اتیلن اکسید برای تولید آئروژل جاذب رطوبت استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که با افزودن ۶ درصد پلی اتیلن اکسید، تخلخل بافتی آئروژل نشاسته کمتر می‌شود اما استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر متلاشی شدن در حضور آب افزایش پیدا می‌کند. شکل (۵) ظاهر آئروژل‌های تولیدشده در این تحقیق و ریزساختار آن‌ها را نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که آئروژل خالص نشاسته میزان جذب آب برابر با ۹۵۷ درصد پس از ۲۴ ساعت قرارگیری در داخل آب دارد. اما زمانی که از پلی اتیلن اکسید در ترکیب نشاسته استفاده شد، این عدد به ۱۲۴۷ درصد افزایش یافت. این میزان قدرت جذب آب در آئروژل تولید شده، کارایی آن را در استفاده به‌عنوان یک سوپرجاذب رطوبت در بسته‌بندی مواد غذایی حساس به رطوبت به اثبات رساند.



شکل (۵): نمای ظاهری و تصویر میکروسکوپی آئروژل نشاسته گندم (الف) و آئروژل نشاسته گندم/پلی اتیلن اکسید (ب) تولیدشده به روش خشک کردن انجمادی [۶۸]

در یک مطالعه دیگر، دی اولیویرا و همکاران [۶۹] آئروژل‌های ترکیبی PVA/سلولز/نانوسلولز تولید نمودند. نتایج حاصل از آزمون جذب بخار آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شکل (۶ – الف) نشان داده شده است. از این نتایج، مشهود است که افزودن نانوسلولز باعث افزایش ظرفیت جذب بخار آب شده است. این موضوع با نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی مطابقت دارد، جایی که آئروژل‌های حاوی نانوسلولز پس از قرار گرفتن در شرایط رطوبت نسبی بالا (رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد) منافذ

بازتری از خود نشان دادند. این عملکرد، ممکن است به‌دلیل وجود مقدار زیادی از گروه‌های هیدروکسیل آزاد باشد که سطح مقطع نانوسلولز آن‌ها را برای برهمکنش با آب، در دسترس قرار می‌دهد. تورم یا افزایش جرم آئروژل‌ها هنگام جذب آب در شکل (۶ – ب) نشان داده شده است. آئروژل‌های خالص PVA پس از غوطه‌ور شدن در آب به مدت ۴۸ ساعت کاملاً متلاشی شدند که به احتمال زیاد به‌دلیل ماهیت بسیار آبدوست PVA بود. همان‌طور که در شکل (۶- ب) مشاهده می‌شود؛ افزودن مقادیر بالاتر سلولز منجر به افزایش تورم در آب شد. به‌طور خاص، آئروژل‌های حاوی نانوسلولز، بالاترین ظرفیت را از نظر تورم آب ارائه کردند. این امر می‌تواند توانایی جذب بالای آب آزادشده توسط محصولات تازه همچون فیله گوشت و ماهی را فراهم سازد [۶۹].



شکل (۶): جذب بخار آب (الف) و تورم آب (ب) آئروژل‌های مختلف بر پایه PVA، سلولز و نانوسلولز [۶۹]

۵-۳- ایجاد عایق حرارتی

یکی دیگر از اهداف استفاده از بسته‌بندی در برخی موارد، ایجاد عایق حرارتی و جلوگیری از تغییرات دمایی سریع در ماده غذایی است. این نکته به‌ویژه در بسته‌بندی و عرضه غذاهای رستورانی و محصولات غذایی که به‌صورت گرم سرو می‌شوند، اهمیت پیدا می‌کند. بسته‌بندی بر پایه پلی‌استایرن منبسط شده متداول‌ترین نوع بسته‌بندی عایق حرارتی است به‌طور گسترده در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. اما پلی‌استایرن حاوی مواد سمی خطرناک برای مصرف‌کننده بوده و همچنین استفاده از آن باعث ورود آلودگی به محیط‌زیست و آسیب به سلامت حیوانات می‌شود. خصوصیت عایقی حرارت پلی‌استایرن به‌دلیل انبساط و تخلخل بافتی آن ایجاد می‌شود. در حالی که این امر می‌تواند توسط آئروژل‌های متخلخل با عملکرد عایقی قابل توجه نیز به‌دست آید. یک عایق حرارتی بیوپلیمری مانند آئروژل، می‌تواند جایگزینی پایدار و مناسب برای پلی‌استایرن منبسط شده باشد و در بسته‌بندی محصولاتی که نیاز به ذخیره‌سازی دمای سرد دارند مانند ماهی و یا حفظ دمای داغ محتویات برای آن‌ها لازم است مانند غذاهای آماده یا نوشیدنی‌های گرم استفاده شود [۲۳]. آئروژل‌های نانوکامپوزیتی پکتین-TiO_2 که از طریق فرآیند سل – ژل تهیه شدند، برای ذخیره‌سازی مواد غذایی حساس به دما پیشنهاد شدند [۷۰]. هدایت حرارتی این آئروژل‌ها W/m K ۰/۰۲۲-۰/۰۲۴ بود که کمتر از هدایت حرارتی هوا (W/m K ۰/۰۳۲ – ۰/۰۲۴) می‌باشد. این محققین نشان دادند که هدایت حرارتی آئروژل‌های پکتین از چگالی آئروژل در یک منحنی U شکل پیروی می‌کند. به نحوی که در چگالی‌های کم و زیاد، بیش‌ترین میزان هدایت حرارتی وجود دارد اما در چگالی متوسط، این آئروژل به‌عنوان عایق حرارتی خوب عمل می‌کند [۷۱].

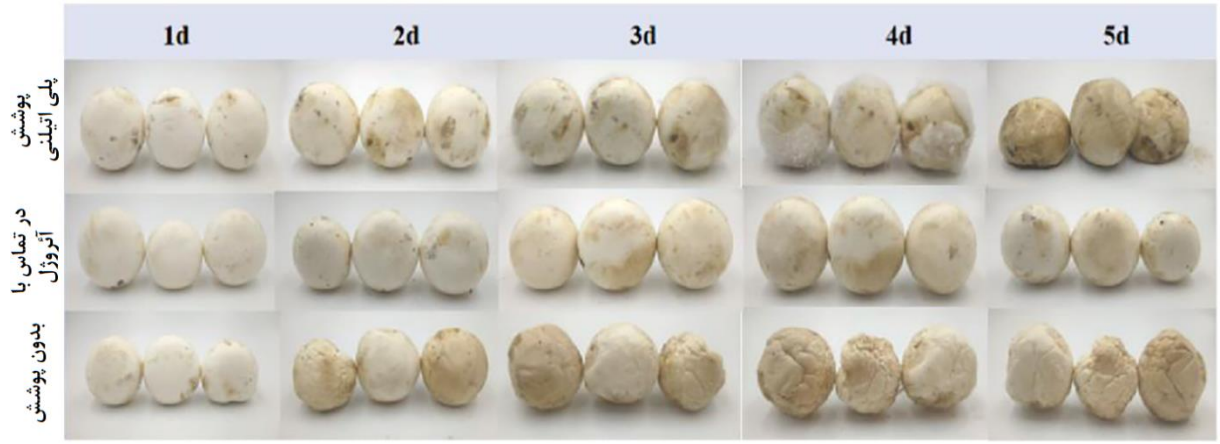
۵-۴- تولید بسته‌بندی فعال

چهارمین زمینه برای استفاده از آئروژل‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی، تولید سامانه‌های بسته‌بندی فعال است. یک نوع آئروژل فعال برای استفاده در افزایش ماندگاری میوه و سبزی تازه طراحی شده است [۷۲]. این نوآوری که آئروژل فرار نامیده شد، مبتنی بر انتشار یک ترکیب فرار (هگزانال) از داخل آئروژل بود که با کاهش تولید اتیلن بر متابولیسم میوه تأثیر می‌گذارد و از رشد میکروب‌های فسادزا جلوگیری می‌کند. این نوع از آئروژل در مطالعاتی بر روی زغال اخته و گوجه فرنگی گیلاسی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج مطلوبی از آن حاصل شد. رشد کپک کمتری در هر دو محصول مشاهده شد و همچنین گوجه فرنگی گیلاسی در مقایسه با نمونه‌های شاهد، استحکام خود را برای مدت طولانی‌تری حفظ کرد [۱۹].

در یک مطالعه دیگر، فونسکا و همکاران [۷۳] از نشاسته طبیعی و آنیونی ذرت در تولید آئروژل استفاده کردند و از عصاره میوه کاج برزیلی به‌عنوان ترکیب فعال در آن استفاده کردند. بررسی خصوصیات آنتی اکسیدانی نشان داد که قدرت مهار

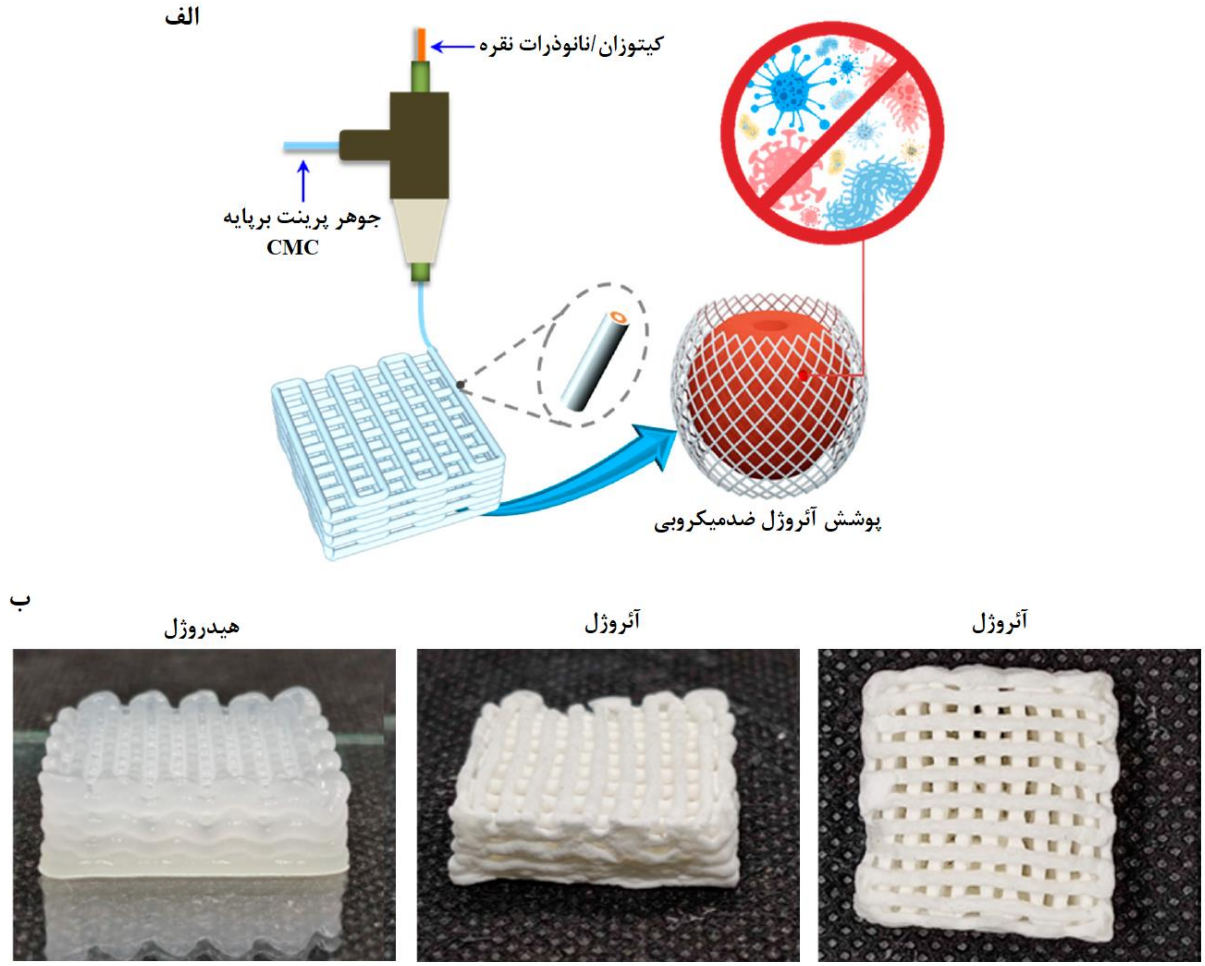
رادیکال آزاد در آئروژل نشاسته حاوی ۱۰ درصد عصاره، نزدیک صددرصد است و این آئروژل‌ها قادرند به‌عنوان یک آنتی اکسیدان قوی در بسته‌بندی مواد غذایی عمل کنند. از نظر خاصیت آنتی اکسیدانی تفاوت زیادی بین آئروژل نشاسته طبیعی و آنیونی وجود نداشت اما در آئروژل نشاسته آنیونی سرعت رهایش ترکیبات عصاره به داخل شبیه‌ساز ماده غذایی بیشتر از آئروژل نشاسته طبیعی بود. بنیتو-گنزالز و همکاران [۷۴] از علف دریایی نانوکریستال سلولز تهیه کردند و از آن در تولید آئروژل استفاده کردند. همچنین از عصاره ترکیبات فنولی همان گیاه به‌عنوان ترکیب فعال در فرمولاسیون آئروژل استفاده کردند و آن را در بسته‌بندی فعال گوشت قرمز مورد استفاده قرار دادند. خاصیت آنتی اکسیدانی آئروژل‌ها بین ۶۰ تا ۹۰ درصد بود و تعبیه آن‌ها در داخل بسته‌بندی گوشت توانست با رهایش ترکیبات فرار عصاره در طول مدت ۱۰ روز، ماندگاری گوشت را تا ۱/۵ برابر افزایش دهد. میزان اکسیداسیون چربی گوشت ۵۰ درصد کمتر از نمونه شاهد بود و از تولید اکسی میوگلوبین نیز به‌طور قابل توجهی جلوگیری شد.

وو و همکاران [۷۵] از ترکیب پکتین مرکبات و نانوکریستال سلولز یک آئروژل فعال تولید کردند که حاوی تیمول به‌عنوان ترکیب مؤثر بود. آئروژل تولید شده اثر ضدمیکروبی خوبی بر برابر باکتری‌های *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* نشان داد. سپس کارایی این آئروژل‌ها در افزایش ماندگاری قارچ دکمه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. سفتی، رنگ، بافت و ترکیبات فنولی قارچ خوراکی در طول مدت نگهداری حفظ شد و ماندگاری قارچ در حالت استفاده از آئروژل حاوی تیمول، بسیار بیشتر از بسته‌بندی معمولی پلی‌اتیلنی بود. شکل (۷) ظاهر نمونه‌های قارچ نگهداری شده در بسته‌بندی پلی‌اتیلنی، نمونه بدون پوشش و نمونه در تماس با آئروژل فعال را نشان می‌دهد. کیفیت بافتی و رنگ نمونه‌های در تماس با آئروژل و تفاوت آن با دیگر نمونه‌ها کاملاً مشهود است و نشانگر کارایی بالای آئروژل فعال در نگهداری این محصول می‌باشد.



شکل (۷): شکل ظاهری نمونه‌های قارچ خوراکی در تماس با آئروژل فعال حاوی تیمول و مقایسه آن با بسته‌بندی پلی اتیلنی و نمونه بدون پوشش [۷۵].

در یک مطالعه دیگر بر روی آئروژل‌های فعال، ژئو و همکاران [۷۶] از روش پرینت سه‌بعدی برای تولید آئروژل‌های فعال استفاده کردند. آن‌ها یک فیلامنت دولایه تهیه کردند و از نانوالیاف کربوکسی متیل سلولز و آکریل آمید به‌عنوان پوسته و ترکیب کیتوزان و نانوذرات نقره به‌عنوان هسته در ماده تزریق شده در پرینت سه‌بعدی استفاده کردند. هدف این محققین توسعه یک بسته‌بندی فعال ضدمیکروبی برای نگهداری میوه و سبزی بود. پس از تهیه شکل نهایی هیدروژل توسط پرینت سه‌بعدی، با استفاده از خشک‌کن انجمادی به آئروژل تبدیل شد و خصوصیات عملکردی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۸) شماتیک فرایند تولید آئروژل با استفاده از پرینت سه‌بعدی (الف) و شکل ظاهری آئروژل قبل و بعد از خشک کردن انجمادی (ب) را نشان می‌دهد. آزمون رهایش نشان داد که آزاد شدن نانوذرات نقره از داخل آئروژل به آهستگی و در زمان طولانی اتفاق می‌افتد و در طول ۱۵ روز اثر خوبی بر روی ممانعت از رشد *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* نشان می‌دهد. این محققین، آئروژل تولیدشده را یک بسته‌بندی فعال ضدمیکروبی مناسب برای افزایش ماندگاری میوه و سبزی پیشنهاد نمودند.



شکل (۸): شماتیک فرایند تولید آئروژل CMC حاوی کیتوزان-نانونقره با استفاده از پرینت سه بعدی (الف) و شکل ظاهری آئروژل قبل و بعد از خشک کردن انجمادی (ب) [۷۶]

۶- نتیجه‌گیری

امروزه فناوری بسته‌بندی مواد غذایی روز به روز در حال گسترش است و نوآوری‌های مختلفی در این عرصه بروز می‌کند. آئروژل‌ها یکی از نوآوری‌های جدید در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی محسوب می‌شوند. با توجه به خصوصیات عملکردی متنوع و گسترده آئروژل‌ها، از این مواد می‌توان برای کاربردهای مختلفی در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی استفاده کرد. این مقاله مروری نشان داد که با تمرکز بر روی هرکدام از ویژگی‌های منحصربه‌فرد آئروژل‌ها می‌توان اهداف مختلفی را در بسته‌بندی مواد غذایی دنبال کرد و با بهره‌گیری از خصوصیات آئروژل در تولید بسته‌بندی جاذب رطوبت، عایق حرارت و یا بسته‌بندی فعال مواد غذایی به‌طور موفق عمل نمود. همچنین بررسی روش‌ها و مواد مختلف مورد استفاده در تولید آئروژل‌ها نشان داد که فناوری تولید آئروژل پیچیدگی زیادی نداشته و با کمترین هزینه تجهیزات و مواد اولیه می‌توان آئروژلی با کارکردهای ویژه تولید نمود. به‌طور کلی، امکان تجاری‌سازی استفاده از آئروژل‌ها در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی بسیار بالاست و با طراحی خلاقانه و تولید محصولات جدید بر پایه آئروژل‌ها می‌توان محصولات جدیدی در جهت افزایش ماندگاری مواد غذایی به بازار عرضه نمود.

۷- مراجع

[1] H. Almasi, N, Ghadiri, and N. Sohrabi, “Time-temperature indicators as food smart packaging: the types, operation mechanisms and applications,” J. Pack. Sci. & Art, vol 12(2), pp. 9-18, 2021 (In Persian).

[2] Q. Zheng, Y.Tian, F.Ye, Y.Zhou, and G.Zhao, “Fabrication and application of starch-based aerogel: Technical strategies,” Trend. Food Sci. & Technol., vol. 99 pp. 608-620, 2020.

[3] C. A. García-Gonz´alez, T. Budtova, L. Duraes, C. Erkey, P. Del Gaudio, and P. Gurikov, "An opinion paper on aerogels for biomedical and environmental applications," Molecules, vol. 24, no. 9, pp. 15-21, 2019.

[4] M. Lehtonen, S. Kekalainen, I. Nikkila, P. Kilpelainen, M. Tenkanen, and K. S. Mikkonen, "Active food packaging through controlled in situ production and release of hexanal," Food Chem: X, vol. 5, pp. 100074-100092, 2020.

[5] S. Plazzotta, S. Calligaris, and L. Manzocco, "Application of different drying techniques to fresh-cut salad waste to obtain food ingredients rich in antioxidants and with high solvent loading capacity," LWT- Food Sci. & Technol, vol. 89, pp. 276–283, 2018.

[6] I. Selmer, J. Karnetzke, C. Kleemann, M. Lehtonen, K. S. Mikkonen and U. Kulozik, "Encapsulation of fish oil in protein aerogel micro-particles," J. Food Eng., vol. 260, pp. 1–11, 2019.

[7] T. Budtova, "Cellulose II aerogels: A review," Cellulose, vol. 26, pp. 81–121, 2019.

[8] A. Du, B. Zhou, Z. H.Zhang and J. Shen, "A special material or a new state of matter: A review and reconsideration of the aerogel," Materials, vol. 6, pp. 941–968, (2013).

[9] H. D. Gesser and P. C, Goswami, "Aerogels and related porous materials," Chem. Rev., vol. 89, pp. 765–788, 1989.

[10] S. S. Kistler, "Coherent expanded aerogels and jellies," Nature, vol. 127(3211), pp. 741-752, 1931.

[11] A. C. Pierre and G. M. Pajonk, "Chemistry of aerogels and their applications," Chem. Rev., vol. 102, pp. 4243–4265, 2002.

[12] S. Zhao, W. J. Malfait, N. Guerrero-Alburquerque, M. M. Koebel and G. Nystr¨om, "Biopolymer aerogels and foams: Chemistry, properties, and applications," Angewandte Chemie, vol. 57, pp. 7580–7608, 2018.

[13] M. E. El-Naggar, S. I. Othman, A. A. Allam and O. M. Morsy, "Synthesis, drying process and medical application of polysaccharide-based aerogels," Int. J. Biol. Macromol., vol. 145, pp. 1115–1128, 2020.

[14] C. A. García-Gonzalez, M. Alnaief and I. Smirnova, "Polysaccharide-based aerogels – Promising biodegradable carriers for frug delivery systems," Carbohydr. Polym., vol. 86, pp. 1426–1438, 2011.

[15] L. E. Nita, A. Ghilan, A. G. Rusu, I. Neamtu, and A. P. Chiriac, "New trends in biobased aerogels," Pharmaceutics, vol. 12, p. 449, 2020.

[16] M. Betz, C. A. García-Gonzalez, R. P. Subrahmanyam, I. Smirnova, and U. Koluzik, "Preparation of novel whey protein-based aerogels as drug carriers for life science," J. Supercrit. Fluid., vol. 72, pp. 111–119, 2012.

[17] P. Del Gaudio, G. Auriemma, T. Mencherini, G. D. Porta, E. Reverchon and R. P. Aquino, "Design of alginate-based aerogel for nonsteroidal anti-inflammatory drugs controlled delivery systems using prilling and supercriticalassisted drying," J. Pharm. Sci., vol. 102, pp. 185–194, 2013.

[18] C. A. García-Gonz´alez, M. Jin, J. Gerth, C. Alvarez-Lorenzo and I. Smirnova, "Polysaccharide-based aerogel microspheres for oral drug delivery," Carbohydr. Polym., vol. 117, pp. 797–806, 2015.

[19] L. Manzocco, K. S. Mikkonen and C. A. García-González, "Aerogels as porous structures for food applications: Smart ingredients and novel packaging materials," Food Struc., vol. 28, p. 100188, 2021.

[20] V. Baudron, M. Taboada, P. Gurikov, I. Smirnova and S. Whitehouse, "Production of starch aerogel in form of monoliths and microparticles," Coll. & Polym. Sci., vol. 298, pp. 477–494, 2020.

[21] Q. Zheng, Y. Tian, F. Ye, Y. Zhou and G. Zhao, "Fabrication and application of starch-based aerogels: Technical strategies," Trend. Food Sci. & Technol., vol. 99, pp. 608–620, 2020.

[22] J. Ivanovic, S. Milovanovic and I. Zizovic, "Utilization of supercritical CO2 as a processing aid in setting functionality of starch-based," Materials, vol. 68, pp. 821–833, 2016.

[23] K. S. Mikkonen, K. Parikka, A. Ghafar and M. Tenkanen, "Prospects of polysaccharide aerogels as modern advanced food materials," Trend. Food Sci. & Technol., vol. 34, pp. 124–136, 2013.

[24] A. Ubeyitogullari and O. N. Ciftci, "Formation of nanoporous aerogels from wheat starch," Carbohydr. Polym., vol. 147, pp. 125–132, 2016.

[25] L. M. Comin, F. Temelli and M. D. A. Saldana, "Barley β-glucan aerogels as a carrier for flax oil via supercritical CO2," J. Food Eng., vol. 111, pp. 625–631, 2012.

[26] K. S. Mikkonen, K. Parikka, J.-P. Suuronen, A. Ghafar, R. Serimaa and M. Tenkanen, "Enzymatic oxidation as a potential new route to produce polysaccharide aerogels," RSC Adv., vol. 4, pp. 11884–11892, 2014.

[27] K. Parikka, I. Nikkila, L. Pitkanen, A. Ghafar, T. Sontag-Strohm and M. Tenkanen, "Laccase/TEMPO oxidation in the production of mechanically strong arabinoxylan and glucomannan aerogels," Carbohydr. Polym., vol. 175, pp. 377–386, 2017.

[28] A. Ubeyitogullari and O. N. Ciftci, "Fabrication of bioaerogels from camelina seed mucilage for food applications," Food Hydrocoll., vol. 102, p. 105597, 2020.

[29] R. J. White, V. L. Budarin, and J. H. Clark, "Pectin-derived porous materials," Chem. Eur. J., vol. 16, pp. 1326–1335. 2010.

[30] M. Alnaief, M. A. Alzaitoun, C. A. García-Gonzalez and I. Smirnova, "Preparation of biodegradable nanoporous microspherical aerogel based on alginate," Carbohydr. Polym., vol. 84, pp. 1011–1018, 2011.

[31] R. R. Escudero, M. Robitzer, F. Di Renzo and F. Quignard, "Alginate aerogels as adsorbents of polar molecules from liquid hydrocarbons: Hexanol as probe molecule," Carbohydr. Polym., vol. 75, pp. 52–57, 2009.

[32] R. R. Mallepally, I. Bernard, M. A. Marin, K. R. Ward and M. A. McHugh, "Superabsorbent alginate

aerogels," J. Supercrit. Fluid, vol. 79, pp. 202–208, 2013.

[33] D. Bilanovic, J. Starosvetsky and R. H. Armon, "Preparation of biodegradable xanthan-glycerol hydrogel, foam, film, aerogel and xerogel at room temperature," Carbohydr. Polym., vol. 148, pp. 243–250, 2016.

[34] L. Manzocco, F. Valoppi, S. Calligaris, F. Andreatta, S.Spilimbergo, and M. C. Nicoli, "Exploitation of k-carrageenan aerogels as template for edible oleogel preparation," Food Hydrocoll., vol. 71, pp. 68–75, 2017.

[35] S. K. Liu, C. C. Zhou, S. Mou, J. L. Li, Zhou and Y. Y. Zeng, "Biocompatible graphene oxide-collagen composite aerogel for enhanced stiffness and in situ bone regeneration," Mat. Sci. & Eng. C- Mat. Biol. App., vol. 105, p. 110137, 2019.

[36] T. Mehling, I. Smirnova, U. Guenther and R. H. H. Neubert, "Polysaccharidebased aerogels as drug carriers," J. Non-Crystal. Solid., vol. 355, pp. 2472–2479, 2009.

[37] A. Munoz-Ruiz, D. M. Escobar-García, M. Quintana, A. Pozos-Guillen, A. Pozos- Guillen and H. Flores, "Synthesis and characterization of a new collagenalginate aerogel for tissue engineering," J. Nanomat., vol. 2019, 2019.

[38] U. Zeynep and C. Erkey, "An emerging platform for drug delivery: Aerogel based systems," J. Control. Rel., vol. 177, pp. 51–63, 2014.

[39] H.-B. Chen, Y.-Z. Wang and D. A. Schiraldi, "Foam-like materials based on whey protein isolate," Euro. Polym. J., vol. 49, pp. 3387–3391, 2013.

[40] C. Kleemann, I. Selmer, I. Smirnova and U. Kulozik, "Tailor made protein based aerogel particles from egg white protein, whey protein isolate and sodium casinate: Influence of the preceding hydrogel characteristics," Food Hydrocoll., vol 83, pp. 365–374, 2018.

[41] I. Selmer, C. Kleemann, U. Kulozik, S. Heinrich and I. Smirnova, "Development of egg white protein aerogels as new material for microencapsulation in food," J. Supercrit. Fluid., vol. 106, pp. 42–49, 2015.

[42] J. C. Arboleda, M. Hughes, L. A. Lucia, J. Laine, K. Ekman and O. J. Rojas, "Soy protein-nanocellulose composite aerogels," Cellulose, vol. 20, pp. 2417–2426, 2013.

[43] V. Santos-Rosales, I. Ardao, C. Alvarez-Lorenzo, N. Ribeiro, A. L. Oliveira and C. A. García- Gonzalez, "Sterile and dual-porous aerogels scaffolds obtained through a multistep supercritical CO2-based approach," Molecules, vol. 24, p. 871, 2019.

[44] Z. L. Li, Y. Y. Ge and L. Wan, "Fabrication of a green porous lignin-based sphere for the removal of lead ions from aqueous media," J. Hazard. Mat., vol. 285, pp. 77–83, 2015.

[45] J. Gaˇcanin, C. V. Synatschke and T. Weil, "Biomedical applications of DNA-based hydrogels," Adv. Func. Mat., vol. 30, Article 1906253, 2019.

[46] E. D. Co and A. G. Marangoni, "Organogels: An alternative edible oil structuring method," J. Am. Oil Chem' Soc., vol. 89, pp. 749–780, 2012.

[47] A. R. Patel and K. Dewettinck, "Edible oil structuring: An overview and recent updates," Food & Func., vol. 7, pp. 20–29, 2016.

[48] P. T´erech and R. G. Weiss, "Low molecular mass gelators of organic liquids and the properties of their gels," Chem. Rev., vol. 97, pp. 3133–3159, 1997.

[49] M. Davidovich-Pinhas, S. Barbut and A. G. Marangoni, "The gelation of oil using ethyl cellulose," Carbohydr. Polym., vol. 117, pp. 869–878, 2015.

[50] Y. Huang, M. He, A. Lu, W. Z. Zhou, S. D. Stoyanovand E. G. Pelan, "Hydrophobic modification of chitin whiskers and its potential application in structuring oil," Langmuir, vol. 31, pp. 1641–1648, 2015.

[51] T. Laredo, S. Barbut and A. G. Marangoni, "Molecular interactions of polymer oleogelation," Soft Matter, vol. 6, pp. 2734–2743, 2011.

[52] C. V. Nikiforidis and E. Scholten, "Polymer organogelation with chitin and chitin nanocrystals," RSC Adv., vol. 5, pp. 37789–37799, 2015.

[53] A. R. Patel, "Structuring edible oils with hydrocolloids: where do we stand," Food Biophys., vol. 13, pp. 113–115, 2018.

[54] A.I. Romoscanu and R. Mezzenga, "Emulsion-templated fully reversible protein-in-oil gels," Langmuir, vol. 22, pp. 7812–7818, 2006.

[55] L. Manzocco, F. Basso, S. Plazzotta and S. Calligaris, "Study on the possibility of developing food-grade hydrophobic bio-aerogels by using an oleogel template approach," Cur. Res. Food Sci., vol. 21, pp. 32-39, 2021.

[56] J. P. Vareda, A. Lamy-Mendes and L. Durães, "A reconsideration on the definition of the term aerogel based on current drying trends," Micropor. & Mesopor. Mat., vol. 258, pp. 211–216. 2018.

[57] S. S. Kistler, "Coherent expanded aerogels and jellies," Nature, vol. 127, pp. 741, 1931.

[58] S. Liu, F. Yao, O. Oderinde, Z. Zhang and G. Fu, "Green synthesis of oriented xanthan gum-graphene oxide hybrid aerogels for water purification," Carbohydr. Polym., vol. 174, pp. 392–399, 2017.

[59] J. Estella, J. C. Echeverría, M. Laguna and J. J. Garrido, "Effect of supercritical drying conditions in ethanol on the structural and textural properties of silica aerogels," J. Porous Mat., vol. 15, no. 6, pp. 705–713, 2008.

[60] C. A. García-González, M. C. Camino-Rey, M. Alnaief, C. Zetzl and I. Smirnova, "Supercritical drying of aerogels using CO2: Effect of extraction time on the end material textural properties," J. Supercrit. Fluid., vol. 66, pp. 297–306, 2012.

[61] H. Tai, M. L. Mather, D. Howard, W. Wang, L. J. White, J. A. Crowe and K. M. Shakesheff, "Control of pore size and structure of tissue engineering scaffolds produced by supercritical fluid processing," Euro. Cells & Mat., vol. 14, pp. 64–77, 2007.

[62] Y. Wang, Y. Su, W. Wang, Y. Fang, S. B. Riffat and F. Jiang, "The advances of polysaccharide-based

[70] [70] A. Nešić, M. Gordić, S. Davidović, Ž. Radovanović, J. Nedeljković, I. Smirnova and P. Gurikov, "Pectin-based nanocomposite aerogels for potential insulated food packaging application," Carbohydr. Polym., vol. 195, pp. 128–135, 2018.

[71] [71] S. Groult and T. Budtova, "Tuning structure and properties of pectin aerogels," Euro. Polym. J., vol. 108, pp. 250–261, 2018.

[72] [72] M. Lehtonen, S. Kek¨al¨ainen, I. Nikkil¨a, P. Kilpel¨ainen, M. Tenkanen and K. S. Mikkonen, "Active food packaging through controlled in situ production and release of hexanal," Food Chem.: X, vol. 5, 2020.

[73] [73] L. M. Fonseca, F. T. da Silva, G. P. Bruni, C. D. Borges, E. da Rosa Zavareze and A. R. G. Dias, "Aerogels based on corn starch as carriers for pinhão coat extract (Araucaria angustifolia) rich in phenolic compounds for active packaging," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 169, pp. 362-370, 2021.

[74] [74] I. Benito-González, A. López-Rubio, P. Galarza-Jiménez and M. Martínez-Sanz, "Multifunctional cellulosic aerogels from Posidonia oceanica waste biomass with antioxidant properties for meat preservation," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 185, pp. 654-663, 2021.

[75] Y. Wu, Y. Lin and P. Shao, "Facile fabrication of multifunctional citrus pectin aerogel fortified with cellulose nanofiber as controlled packaging of edible fungi," Food Chemistry, vol. 374, 2022.

[76] W. Zhou, J. Fang, S. Tang, Z. Wu and X. Wang, "3D-printed nanocellulose-based cushioning–antibacterial dual-function food packaging aerogel," Molecules, vol. 26 no. 12, p. 3543, 2021.

aerogels: Preparation and potential application," Carbohydr. Polym., vol. 226, p. 115242, 2019.

[63] [63] X. W. Ni, F. Ke, M. Xiao, K. Wu, Y. Kuang, H. Corke and F. T. Jiang, "The control of ice crystal growth and effect on porous structure of konjac glucomannan-based aerogels," Int. J. Biol. Macromol., vol. 92, pp. 1130–1135, 2016.

[64] [64] Y. Wang, L. Zhu, F. Y. Zhu, L. J. You, X. Q. Shen and S. J. Li, "Removal of organic solvents/oils using carbon aerogels derived from waste durian shell," J. Taiwan Inst. Chem. Eng., vol. 78, pp. 351–358, 2017.

[65] [65] R. Dobrucka and R. Przekop, "New perspectives in active and intelligent food packaging," J. Food Proc. & Preserv., vol. 43, Article e 14194, 2019.

[66] [66] Y.Yan, F. Ge, Y. Qin, M. Ruan, Z. Guo and C. He, "Ultralight and robust aerogels based on nanochitin towards water-resistant thermal insulators," Carbohydr. Polym., vol. 248, Article 116755, 2020.

[67] [67] O. N. Khlebnikov, I. V. Postnova, L.-J. Chen and Y. A. Shchipunov, "Silication of dimensionally stable cellulose aerogels for improving their mechanical properties" Coll. J., vol. 82, pp. 448–459, 2020.

[68] [68] F. T. da Silva, J. P. de Oliveira, L. M. Fonseca, G. P. Bruni, E. da Rosa Zavareze and A. R. G. Dias, "Physically cross-linked aerogels based on germinated and non- germinated wheat starch and PEO for application as water absorbers for food packaging," Int. J. Biol. Macromol., vol. 155, pp. 6–13, 2020.

[69] [69] J. P. de Oliveira, G. P. Bruni, M. J. Fabra, E. da Rosa Zavareze, A. López-Rubio and M. Martínez-Sanz, "Development of food packaging bioactive aerogels through the valorization of Gelidium sesquipedale seaweed," Food Hydrocoll., vol. 89, pp. 337-350, 2019.