Packaging Sciences and Techniques
Vol. 16, No. 2, Summer 2025, Serial No. 62
ISSN: 2228-6675 , E-ISSN: 2980-7824

A Review on the Mechanical, Barrier, Antimicrobial, and Optical Properties of Chitosan-Based Films in Bio-Based Packaging

Moghadase Akbari Amri*[1]، Ghasem Asadpour[2]
[1]Correspondence: PhD, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email Address: akbari_moghadase@yahoo.com
[2]Associate Professor, Department of Wood and Cellulose Products Industries, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran. mail Address: asadpur2002@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 18 February 2025
Received in revised form: 9 June 2025
Accepted: 2 June 2025
Available online: 21 September 2025

Keywords:
Chitosan Films
Mechanical Properties
Barrier Properties
Antimicrobial Properties
UV Protection
Active Packaging

ABSTRACT

The increasing interest in biopolymers is driven by the depletion of fossil fuel resources and the environmental impact of non-biodegradable plastic waste accumulation. Many biopolymers are derived from food waste to not only reduce waste generation but also develop novel packaging materials for the food industry. Chitosan has emerged as a prominent alternative to synthetic polymers and a fundamental material for innovative packaging solutions. Evaluating the suitability of a material for food packaging applications necessitates the assessment of its mechanical properties and permeability. Mechanical properties are crucial in determining the performance of films during transportation, handling, and storage of packaged food products, whereas barrier properties play a significant role in preserving product quality. Pure chitosan films exhibit favorable mechanical and barrier properties, making them suitable for food packaging and active packaging applications. Additionally, chitosan possesses strong antimicrobial activity against a wide range of filamentous fungi, yeasts, and both Gram-positive and Gram-negative bacteria. The combination of its antimicrobial properties and film-forming capability has positioned chitosan as a key candidate for the development of active packaging systems that can inhibit microbial growth and enhance food safety. From an optical perspective, pure chitosan films demonstrate high transparency in the visible region, which enhances their consumer acceptance. Furthermore, these films exhibit significant UV absorption, thereby protecting food products from UV-induced lipid oxidation and contributing to prolonged food quality retention.

Cite this article: M. Akbari Amri and Gh. Asadpour, "A Review on the Mechanical, Barrier, Antimicrobial, and Optical Properties of Chitosan-Based Films in Bio-Based Packaging," Journal of Packaging Sciences and Techniques, vol. 16, no. 2, pp. 59-71, 2025. DOR: 20.1001.1.22286675.1404.16.62.5.1
Publisher: Imam Hossein University.
© The Author(s).

Abstract

Introduction

Growing environmental concerns arising from the accumulation of plastic waste and the dependence on fossil fuel–based resources have made the search for sustainable alternatives essential. In this context, renewable and biodegradable biopolymers have emerged as promising candidates for the packaging industry, particularly in the food sector. Among these materials, chitosan—the second most abundant polysaccharide in nature after cellulose—has gained significant scientific attention due to its unique physicochemical and functional properties. Derived through the deacetylation of chitin present in crustacean shells such as shrimp and crab, chitosan is biodegradable, non-toxic, and exhibits excellent film-forming capability.

The mechanical performance of packaging films plays a key role in ensuring their integrity during production, transportation, handling, and storage. Pure chitosan films generally display good tensile strength, primarily due to the formation of extensive hydrogen bonding networks among hydroxyl and amino groups along polymer chains. These interactions are crucial in establishing a stable three-dimensional structure. The mechanical behavior is influenced by several parameters, including molecular weight, degree of deacetylation, solvent type, and drying conditions. A higher molecular weight enhances polymer chain entanglement, thereby improving film strength, while a higher degree of deacetylation increases the number of free amino groups and consequently strengthens intermolecular hydrogen bonding.

Result and Discussion

In terms of barrier properties, chitosan films exhibit excellent resistance to oxygen permeation, a vital feature for preventing lipid oxidation and rancidity in food products. Several studies have reported that the oxygen permeability of chitosan films can be up to an order of magnitude lower than that of conventional polyethylene films. However, their major drawback lies in the relatively high water vapor permeability caused by the hydrophilic nature of polysaccharides. This limitation reduces the film’s effectiveness for packaging moisture-sensitive goods. Parameters such as film thickness, relative humidity, and degree of deacetylation significantly influence water vapor transmission. Therefore, incorporating hydrophobic components or designing multilayered chitosan-based films is a promising strategy to enhance moisture resistance.

One of the most attractive features of chitosan for active packaging applications is its inherent antimicrobial activity. Chitosan is effective against a wide range of microorganisms, including bacteria, fungi, and yeasts. Its antimicrobial mechanism involves multiple pathways:

electrostatic interaction between positively charged chitosan and negatively charged microbial cell membranes disrupts membrane integrity, leading to leakage of intracellular components and cell death. Moreover, chitosan can chelate essential metal ions, penetrate microbial cells, bind to DNA, and interfere with protein synthesis. Strong inhibitory effects have been reported against Gram-positive bacteria such as *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes*, as well as Gram-negative bacteria including *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium*. The antimicrobial efficacy depends on molecular weight, degree of deacetylation, pH, and concentration.

Optically, chitosan films demonstrate high transparency in the visible light range, allowing product visibility while effectively blocking harmful ultraviolet radiation. This UV-blocking capacity prevents photooxidation of lipids and extends the shelf life of light-sensitive foods. The UV absorption is attributed to the presence of conjugated double bonds and specific functional groups within the polymer backbone.

Among the various preparation techniques, the solution casting method is the most widely adopted for fabricating chitosan films. In this approach, a homogeneous chitosan solution is prepared in an acidic medium, poured onto a smooth substrate, and dried under controlled conditions to form a uniform film. Parameters such as chitosan concentration, solvent composition, drying temperature, and film thickness strongly influence the final structural and mechanical performance. Other techniques, including extrusion and coating, have also been explored for industrial-scale production.

Conclusion

Overall, chitosan-based films combine desirable mechanical strength, outstanding oxygen barrier performance, intrinsic antimicrobial activity, high transparency, and UV-shielding ability. These multifunctional properties make them strong candidates for the development of sustainable bio-based packaging materials. Although challenges such as high water vapor permeability remain, ongoing research on blending chitosan with nanoparticles, other biopolymers, or hydrophobic agents shows great potential for improvement. Future studies should also focus on synergistic combinations with bioactive compounds and process optimization to enhance functionality. Considering the growing demand for environmentally friendly materials, chitosan-based films represent a highly promising pathway toward the next generation of eco-efficient packaging solutions.

«علوم و فنون بسته‌بندی»
سال شانزدهم، شماره ۶۲، تابستان ۱۴۰۴؛ ص ۷۱-۵۹
شاپای چاپی: ۲۲۲۸-۶۶۷۵| شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۷۸۲۴

مروری بر خواص مکانیکی، ممانعتی، ضدمیکروبی و نوری فیلم‌های مبتنی بر کیتوزان در بسته‌بندی‌های زیست‌پایه

مقدسه اکبری امری[1*]، قاسم اسدپور[2]

[1] دکترای تخصصی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: akbari_moghadase@yahoo.com

[2] دانشیار گروه صنایع چوب و فراورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: asadpur2002@yahoo.com

چکیده

افزایش علاقه به پلیمرهای زیستی به دلیل کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از تجمع زباله‌های پلاستیکی زیست‌تخریب‌پذیر، موجب گسترش تحقیقات در این زمینه شده است. بسیاری از پلیمرهای زیستی از ضایعات غذایی تولید می‌شوند تا علاوه بر کاهش پسماند، مواد بسته‌بندی نوینی برای صنایع غذایی فراهم کنند. کیتوزان یکی از گزینه‌های برجسته به‌عنوان جایگزینی برای پلیمرهای مصنوعی[1] و ماده‌ای پایه در تولید بسته‌بندی‌های جدید مطرح است. برای ارزیابی مناسب‌بودن یک ماده در کاربردهای بسته‌بندی غذایی، بررسی خواص مکانیکی و نفوذپذیری آن ضروری است. خواص مکانیکی تعیین‌کننده عملکرد فیلم‌ها در طول فرایند حمل‌ونقل، جابه‌جایی و نگهداری مواد غذایی بسته‌بندی‌شده هستند، درحالی‌که خواص ممانعتی نقش مهمی در حفظ کیفیت محصول ایفا می‌کنند. فیلم‌های کیتوزان خالص از نظر مکانیکی و ممانعتی عملکرد مطلوبی دارند و برای بسته‌بندی غذایی و بسته‌بندی‌های فعال مناسب هستند. این پلیمر دارای خاصیت ضدمیکروبی قوی در برابر طیف گسترده‌ای از قارچ‌های رشته‌ای، مخمرها و باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی است. ترکیب این خاصیت با قابلیت فیلم‌سازی، کیتوزان را به گزینه‌ای ایده‌آل برای توسعه بسته‌بندی‌های فعال تبدیل کرده است که می‌تواند رشد میکروارگانیسم‌ها را مهار کرده و ایمنی مواد غذایی را افزایش دهد. از نظر خواص نوری، فیلم‌های کیتوزان شفافیت بالایی در ناحیه مرئی دارند که موجب پذیرش بهتر آن‌ها از سوی مصرف‌کنندگان می‌شود. علاوه بر این، این فیلم‌ها توانایی بالایی در جذب پرتو UV[2] دارند که از اکسیداسیون لیپیدی ناشی از تابش فرابنفش جلوگیری کرده و به حفظ کیفیت مواد غذایی کمک می‌کند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی ترویجی
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

کلیدواژه‌ها:
فیلم‌های کیتوزان
خواص مکانیکی
خواص ممانعتی
خواص ضدمیکروبی
حفاظت UV
بسته‌بندی فعال

استناد: اکبری امری، مقدسه، اسدپور، قاسم، " مروری بر خواص مکانیکی، ممانعتی، ضدمیکروبی و نوری فیلم‌های مبتنی بر کیتوزان در بسته‌بندی‌های زیست‌پایه"، نشریه علوم و فنون بسته‌بندی، دوره ۱۶، شماره۶۲، صفحات ۷۱-۵۹، ۱۴۰۴. DOR: 20.1001.1.22286675.1404.16.62.5.1

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).
© نویسندگان.

[1] Synthetic polymers
[2] Ultraviolet (UV) radiation

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی، توجه زیادی به یافتن جایگزین‌هایی برای پلاستیک‌های مبتنی بر نفت جلب شده است، زیرا زباله‌های پلاستیکی به یک معضل جدی تبدیل شده‌اند [۱، ۲]. یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش این مشکل، استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر به جای پلیمرهای غیرقابل تجدید در بسته‌بندی است که می‌تواند با کاهش زباله‌های جامد، آلودگی محیط‌زیست را کاهش دهد. در همین راستا، طی سال‌های اخیر، استفاده از فیلم‌های مصنوعی در بسته‌بندی مواد غذایی رشد قابل‌توجهی داشته است [۳ و ۴].

پلیمرهای مصنوعی مشتق‌شده از منابع پتروشیمی مانند پلی‌اتیلن ترفتالات[1]، پلی‌وینیل کلراید[2]، پلی‌اتیلن[3]، پلی‌پروپیلن[4]، پلی‌استایرن[5] و پلی‌آمید[6] به دلیل خواص مطلوبی همچون استحکام مکانیکی مناسب و ایجاد مانعی مؤثر در برابر اکسیژن، دی‌اکسیدکربن، بخار آب و ترکیبات آروماتیک[7]، به طور گسترده در بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳ و ۵]. همچنین، این پلیمرها با هزینه کمی تولید می‌شوند، بااین‌حال، عیب بزرگ آن‌ها عدم تجزیه‌پذیری زیستی است که موجب مشکلات زیست‌محیطی می‌شود [۶].

سوزاندن پلی‌الفین‌ها[8] یکی از روش‌های رایج برای دفع آن‌ها محسوب می‌شود، اما این فرایند منجر به انتشار زیاد دی‌اکسیدکربن شده و پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی به همراه دارد. علاوه‌بر این، انباشت این مواد به مشکلی جدی برای محیط‌زیست تبدیل شده است. یکی از راهکارهای کاهش این معضل، توسعه پلیمرهای زیست‌تجزیه‌پذیر برای بسته‌بندی مواد غذایی است. هرچند جایگزینی کامل پلیمرهای پتروشیمی با پلیمرهای زیستی در حال حاضر امکان‌پذیر نیست، اما پلیمرهای زیستی جدید می‌توانند به طور جزئی جایگزین مواد غیرقابل‌تجزیه زیستی شوند و بسته به کاربردشان، قابلیت‌هایی مانند جلوگیری از کاهش رطوبت و عطر، حمل‌ونقل محلول و کاهش نفوذ اکسیژن را ارائه دهند [۷ و ۸]. علاوه بر این، این پلیمرها نقش مهمی در افزایش ماندگاری مواد غذایی دارند و با امکان تماس مستقیم با مواد غذایی تازه یا فراوری‌شده، باعث حفظ کیفیت آن‌ها می‌شوند [۹]. مواد اولیه مورد استفاده در توسعه این پلیمرهای زیستی از منابع طبیعی تجدیدپذیر همچون پروتئین‌ها، لیپیدها[9] و پلی‌ساکاریدها[10] استخراج شده‌اند. همچنین، در برخی موارد برای بهبود ویژگی‌های فیلم‌های زیستی، از افزودنی‌های مختلف استفاده می‌شود [۸ و ۱۰].

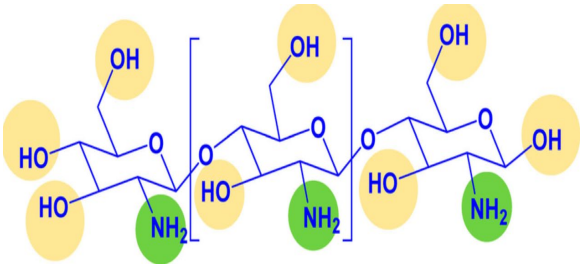
۲- کیتوزان

کیتوزان، مشتق استیل‌زدایی شده از کیتین، یک پلی‌ساکارید خطی کاتیونی با وزن مولکولی بالا است که از کوپلیمرهای β-(1→4)-لینک‌شده ۲-آمین-۲-دئوکسی-دی-گلوکوپیرانوز β-دی-گلوکوزامین[11] و N-استیل-β-دی-گلوکوزامین[12] تشکیل شده است [۱۱] (شکل ۱). این ترکیب از طریق استیل‌زدایی قلیایی کیتین که عمدتاً از پوسته سخت‌پوستانی مانند میگو و خرچنگ استخراج می‌شود، تولید می‌گردد [۱۲]. کیتوزان ماده‌ای زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر است که قابلیت اصلاح‌پذیری بالایی دارد و می‌تواند به اشکال مختلفی مانند فیلم‌ها، ژل‌ها، نانوذرات و میکروذرات تهیه شود. این ترکیب علاوه بر غیرسمی بودن و زیست‌سازگاری بالا، از مقاومت شیمیایی خوبی برخوردار است. همچنین، کیتوزان به فلزات و پروتئین‌ها تمایل داشته و به دلیل خواص ضدمیکروبی قوی، به‌طور گسترده در صنایع دارویی، پزشکی و غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳ و۱۴].

فیلم‌های مبتنی بر کیتوزان با عملکردهای متنوع را می‌توان به روش‌های مختلفی مانند ریخته‌گری مستقیم، غوطه‌وری، پوشش‌دهی، اکستروژن و مونتاژ لایه‌به‌لایه تهیه کرد. در بسته‌بندی مواد غذایی، این فیلم‌ها عمدتاً به‌عنوان پوشش‌های ضدمیکروبی، موانع محافظتی و حسگرهای زیستی کاربرد دارند [۱۵]. عواملی مانند pH، ساختار فیزیکی و ویژگی‌های دیواره سلولی میکروارگانیسم‌های هدف، به همراه خصوصیات کیتوزان از جمله وزن مولکولی، درجه استیل‌زدایی، درجه جایگزینی، غلظت و منبع اولیه، نقش مهمی در میزان فعالیت ضدمیکروبی آن ایفا می‌کنند. همچنین، این ویژگی را می‌توان با ترکیب کیتوزان در سیستم‌های نانومقیاس همراه با ترکیبات زیستی فعال طبیعی، فلزات یا داروها تقویت کرد [۱۶ و ۱۷].

[1] Polyethylene terephthalate
[2] Polyvinyl chloride
[3] Polyethylene
[4] Polypropylene
[5] Polystyrene
[6] Polyamide
[7] Aromatic compounds
[8] Polyolefins

[9] Lipids
[10] Polysaccharides
[11] 2-Amino-2-deoxy-D-glucopyranose (β-D-glucosamine)
[12] N-acetyl-β-D-glucosamine



شکل (۱): ساختار شیمیایی کیتوزان [۱۲]

۲-۱- ویژگی‌های فیلم و پوشش کیتوزان

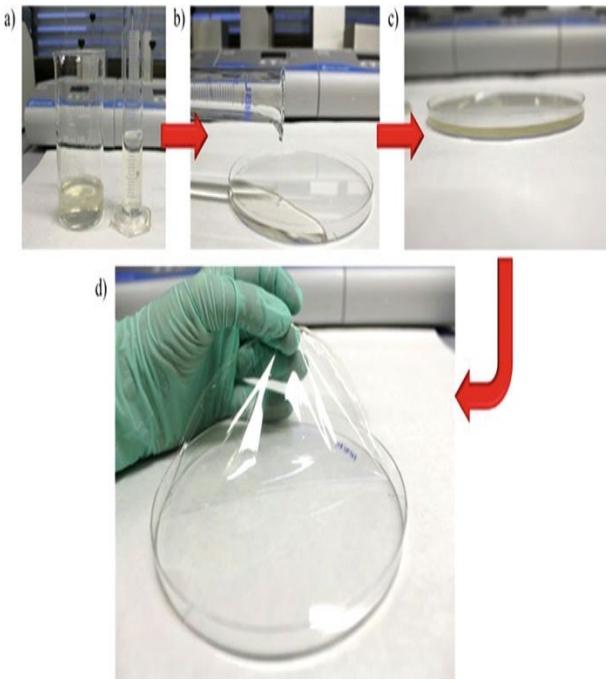
کیتوزان، پس از سلولز، دومین پلی‌ساکارید فراوان در جهان است و می‌توان آن را از منابع تجدیدپذیر مختلف، استخراج کرد [۱۸]. این ویژگی، همراه با هزینه پایین و دردسترس‌بودن تجاری، اهمیت بالایی دارد، زیرا مواد بسته‌بندی سهم قابل‌توجهی در هزینه نهایی محصولات دارند [۸]. قابلیت تشکیل فیلم کیتوزان امکان تولید فیلم‌ها و پوشش‌هایی با خواص مکانیکی مناسب، نفوذپذیری انتخابی به CO_2 و O_2 و ویژگی‌های ضدمیکروبی را فراهم می‌کند. این پوشش‌ها می‌توانند مستقیماً روی مواد غذایی اعمال شوند و موجب افزایش ایمنی و ماندگاری آن‌ها شوند. برای بهبود عملکرد این فیلم‌ها و گسترش کاربردهای آن، استراتژی‌های مختلفی پیشنهاد شده است که شامل تغییر درجه استیل‌زدایی، تنظیمpH ، تغییر نوع حلال و ترکیب آن با نرم‌کننده‌ها یا سایر ترکیباتی مانند پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها است [۹]. در شکل ۲، نمونه‌ای از فیلم کیتوزان تهیه‌شده در آزمایشگاه نشان‌داده‌شده است. این فیلم با روش ریخته‌گری در پتری‌دیش [1] تولید و طی دو روز در دمای اتاق خشک شده است. درخشندگی و شفافیت این فیلم‌ها نشان‌دهنده خلوص بالای کیتوزان است [۳].

شکل (۲): نمونه‌ای از فیلم خالص کیتوزان تهیه‌شده از محلول آبی ۱ درصد وزنی کیتوزان در اسید استیک [2] ۱ درصد (حجمی/حجمی) [۳]

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از محلول‌های کیتوزان، نیاز به محیط اسیدی برای حل‌شدن آن است. با افزایش pH محلول به بالاتر از ۶/۲، به دلیل خنثی شدن گروه‌های آمینی، کیتوزان به‌صورت ژل هیدراته رسوب می‌کند. برای رفع این محدودیت و گسترش کاربردهای کیتوزان در محیط‌های خنثی، پایداری محلول‌های آن در pHبین ۷ تا ۷/۴ با افزودن نمک گلیسرول‌فسفات بررسی شده است [۱۹]. نتایج نشان داد که این نمک با نقش خود به‌عنوان بافر در محدوده‌ی نزدیک به pH خنثی و با کنترل تعاملات آبگریز و پیوندهای هیدروژنی، شرایط لازم برای پایدار ماندن محلول کیتوزان در محیط خنثی را فراهم می‌کند. به‌عنوان جایگزینی برای محلول‌های اسیدی، یک روش جدید مبتنی بر سیستم قلیایی (قلیا/اوره) توسعه یافته است که از تکنیک انجماد-ذوب برای حل کردن کیتوزان استفاده می‌کند [۲۰]. در این روش، کیتوزان با وزن مولکولی متوسط و کم پس از چندین چرخه انجماد-ذوب در محلول هیدروکسید سدیم/اوره به‌طور کامل حل شده است [۲۱]. همچنین، جایگزین‌های دیگری مانند استفاده از LiOH یا تیواوره [3] نیز بررسی شده‌اند، و نتایج نشان داده که کیتوزان با موفقیت در محلول‌های آبی LiOH/اوره [۲۲] و هیدروکسید سدیم/تیواوره [۲۳] حل می‌شود.

بااین‌حال، برای تولید فیلم‌ها یا پوشش‌های مناسب بسته‌بندی مواد غذایی، همچنان استفاده از محلول کیتوزان در محیطی کمی اسیدی مانند اسید استیک رایج‌ترین روش است. در میان روش‌های مختلف تهیه فیلم‌های کیتوزانی، روش ریخته‌گری [4] بیشترین کاربرد را دارد (شکل ۳). در این روش، ابتدا محلول همگنی از کیتوزان در یک حلال مناسب تهیه می‌شود (شکل ۳a) سپس، این محلول روی یک سطح صاف، معمولاً پتری‌دیش، ریخته می‌شود (شکل ۳ b, c). اگر محلول مورد استفاده اسیدی باشد، فرآیند خشک شدن در دمای محیط یا شرایط خاص انجام می‌شود تا حلال به‌طور کامل تبخیر گردد. در نهایت، فیلم‌های تشکیل‌شده از ظرف جدا شده و آماده استفاده خواهند بود (شکل ۳d).

[1] Petri dish
[2] Acetic acid
[3] Thiourea
[4] Casting method



شکل (۳): فرآیند تهیه فیلم‌های کیتوزان از طریق روش قالب‌گیری [۱]: (الف) گام اول، برای به‌دست آوردن حل شدن، در این مورد یک محلول ۱ درصد وزنی کیتوزان در محلول آبی ۱ درصد (حجم/حجم) اسید استیک. (ب) گام دوم، محلول بر روی یک پتری‌دیش ریخته می‌شود. (ج) گام سوم، محلول به طور یکنواخت بر روی صفحه پخش می‌شود. این گام برای به‌دست آوردن ضخامت یکنواخت در تمام فیلم اهمیت دارد. (د) در نهایت، محلول اجازه داده می‌شود تا خشک شود و حلال تبخیر شود و فیلم کیتوزان از سطح جدا می‌شود [۳].

۲-۱-۱- خواص مکانیکی

بررسی خواص مکانیکی، به‌ویژه مقاومت کششی [۲] پلیمرهای زیستی مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی، نقش مهمی در پیش‌بینی رفتار و دوام آن‌ها در مراحل جابه‌جایی، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل دارد. گرچه این موضوع کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، اما تحلیل خواص کلیدی مانند نیروی سوراخ‌شدن [۳] و میزان تغییر شکل ناشی از آن نیز از اهمیت بالایی برخوردار است [۲۵ ، ۲۴]. مقایسه این ویژگی‌ها با خواص مکانیکی پلیمرهای مصنوعی تجاری، امکان ارزیابی کارایی و پیش‌بینی کاربردهای بالقوه پلیمرهای زیستی جدید را فراهم می‌کند [۲۶]. خواص مکانیکی مانند مقاومت کششی، درصد تغییر طول در نقطه شکست [۴]، نیروی سوراخ‌شدن و تغییر شکل ناشی از آن تحت‌تأثیر ترکیب فیلم، ماهیت اجزا، تجهیزات آزمایش و شرایط محیطی مانند رطوبت نسبی و دما قرار دارند. برای ارزیابی این خواص در فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر، معمولاً از دستگاه تستورومتر [۵] استفاده می‌شود.

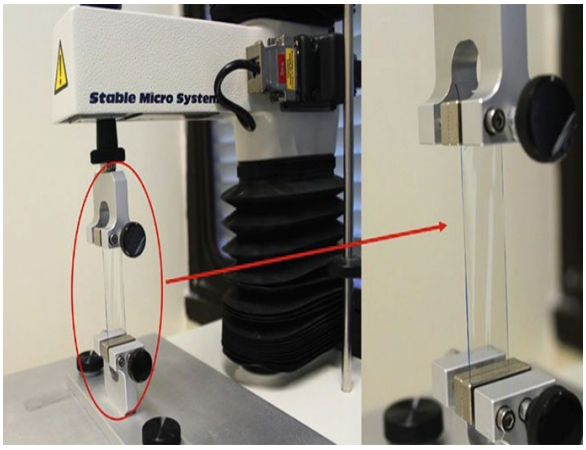
مقاومت کششی حداکثر تنشی است که یک فیلم قبل از گسیختگی تحمل می‌کند، درحالی‌که درصد تغییر طول در نقطه شکست، حداکثر میزان کشش فیلم پیش از پارگی را نشان می‌دهد [۲۸ - ۲۶]. در شکل ۴، نمونه‌ای از آزمایش مکانیکی فیلم کیتوزان نمایش داده شده است. در این آزمایش، فیلم بین گیره‌های دستگاه تستورومتر قرار می‌گیرد و بازوی بالایی دستگاه با سرعت ثابتی در جهت عمودی حرکت می‌کند تا فیلم پاره شود. تستورومتر نیروی لازم برای حفظ این سرعت و فاصله را اندازه‌گیری کرده و نمودار تنش-کرنش را ترسیم می‌کند که از آن، مقادیر مقاومت کششی و درصد تغییر طول را می‌توان محاسبه کرد [۳].

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که این خواص تحت‌تأثیر عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های کیتوزان (درجه استیلاسیون [۶]، وزن مولکولی)، روش مورد استفاده برای تهیه فیلم، درصد کیتوزان در فیلم، زمان ذخیره‌سازی و شرایط آزمایش قرار دارند. کیتوزان پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل و گروه‌های آمینی در فیلم تشکیل می‌دهد. در فرایند تشکیل فیلم، افزایش این گروه‌ها، پیوندهای هیدروژنی را تقویت کرده و استحکام فیلم را بالا می‌برد. وزن مولکولی کیتوزان نیز بر نوع و تعداد تعاملات بین زنجیره‌های پلیمری و حلال تأثیرگذار است؛ به‌طوری که کیتوزان با وزن مولکولی بالا، به دلیل درجه پلیمریزاسیون [۷] بیشتر، تعاملات قوی‌تری بین زنجیره‌ها ایجاد کرده و منجر به تشکیل شبکه‌های [۸] مستحکم‌تر می‌شود، درحالی‌که با کاهش وزن مولکولی، این تعاملات کاهش می‌یابد [۲۹-۲۸، ۷].

[1] Casting:
شامل ریختن محلول روی سطح صاف و خشک شدن آن تا تشکیل فیلمی نازک، یکنواخت و پیوسته می‌باشد

[2] Tensile strength
[3] Puncture force

[4] Percentage of elongation at break (%)
[5] Texturometer
[6] Degree of acetylation
[7] Degree of polymerization (DP)
[8] Matrices



شکل (۴): نمونه‌ای از فیلم ۱ درصد کیتوزان که در گیره‌های دستگاه تستومتر قرار گرفته و آماده برای انجام تست مکانیکی طبق روش استاندارد ASTM D- ۸۸۲ است [۳].

زمان ذخیره‌سازی نقش مهمی در تغییر خواص مکانیکی فیلم‌های کیتوزانی دارد [۷]. درصد کشش این فیلم‌ها نیز به وزن مولکولی کیتوزان و نوع حلال مورد استفاده وابسته است [۲۸]. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از اسید استیک به‌عنوان حلال، مقاومت کششی بالاتری را در فیلم‌ها ایجاد می‌کند، درحالی‌که اسید سیتریک منجر به افزایش درصد کشش تا شکست می‌شود [۷ و ۲۸]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در محلول اسید استیک، کیتوزان دی‌مرهایی [۱] تشکیل می‌دهد که بیانگر تعاملات بین‌مولکولی قوی‌تر است. این امر موجب می‌شود که فیلم‌های تهیه‌شده با اسید استیک [۲]، ساختاری فشرده‌تر و مستحکم‌تر نسبت به فیلم‌هایی داشته باشند که با سایر حلال‌های اسیدی ساخته شده‌اند [۲۸ و ۳۰]. یکی از مراحل ضروری در تهیه این فیلم‌ها، فرآیند خشک کردن است. مطالعاتی که تأثیر سه روش مختلف خشک کردن (در دمای محیط، در آون و با اشعه مادون قرمز) را بررسی کرده‌اند، نشان داده‌اند که نوع روش خشک کردن تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی فیلم‌ها ندارد [۳۱].

۲-۱-۲- خواص ممانعتی [۳]

خواص ممانعتی فیلم‌های پلیمری نقش مهمی در حفظ کیفیت مواد غذایی و پیش‌بینی عمر مفید آن‌ها در بسته‌بندی دارند [۳۲]. یکی از وظایف اصلی این فیلم‌ها، کاهش انتقال مولکول‌ها بین محیط و ماده غذایی است تا تازگی و کیفیت محصول حفظ شود. این خواص با اندازه‌گیری نفوذپذیری و انتقال برخی مولکول‌ها مانند گازهای O_2 و CO_2، بخار آب، بخارهای آلی یا مایعات از طریق فیلم ارزیابی می‌شوند. پلاستیک‌ها به‌طور نسبی در برابر مولکول‌های کوچک نفوذپذیر هستند، به این معنا که این مولکول‌ها می‌توانند از دیواره بسته‌بندی عبور کرده و بر کیفیت محصول تأثیر بگذارند، که در نهایت منجر به کاهش عمر مفید آن می‌شود [۲۵، ۳۴ - ۳۳]. در میان خواص ممانعتی، نفوذپذیری بخار آب به دلیل نقش اساسی آب در واکنش‌های تخریب، حفظ تازگی و بافت مواد غذایی (مانند تردی یا جلوگیری از خشکی) و همچنین به دلیل سهولت اندازه‌گیری، بیشترین توجه را در مطالعات به خود اختصاص داده است [۳۵]. نفوذپذیری اکسیژن، هرچند کمتر مطالعه شده، یکی از پارامترهای مهم در بسته‌بندی مواد غذایی است، اما به دلیل نیاز به تجهیزات اندازه‌گیری خاص، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. اکسیژن باعث اکسید شدن غذا می‌شود و تغییر رنگ، بو و طعم، قهوه‌ای شدن آنزیمی و کاهش ویتامین‌ها را به همراه دارد. بااین‌حال، نفوذپذیری کنترل‌شده اکسیژن برای حفظ تازگی میوه‌ها و سبزیجات تازه از طریق تنظیم فرآیند تنفس آن‌ها ضروری است. به‌طور کلی، فیلم‌های زیست‌پلیمری با ماهیت آبدوستی، ممانعت خوبی در برابر اکسیژن دارند اما در مقابل بخار آب نفوذپذیری بالاتری از خود نشان می‌دهند [۲۵، ۳۹-۳۳].

با درنظرگرفتن پارامترهای نفوذپذیری، می‌توان تشخیص داد که فیلم زیستی توسعه‌یافته برای چه نوع مواد غذایی یا کاربردی مناسب‌تر است [۲۵ و ۳۴]. نفوذپذیری بخار آب نشان‌دهنده میزان عبور آب از فیلم در واحد سطح و زمان (g/s·m·Pa) است که تحت تأثیر اختلاف فشار و ضخامت ماده قرار دارد. استاندارد ASTM E96 رایج‌ترین روش برای اندازه‌گیری این ویژگی است که معمولاً از طریق روش وزنی انجام می‌شود. فیلم‌های کیتوزانی، مانند سایر فیلم‌های خوراکی پلی‌ساکاریدی، به دلیل ماهیت آبدوستی بالا، مقاومت پایینی در برابر نفوذ آب دارند [۲۸ و ۳۴]. میزان نفوذپذیری بخار آب در این فیلم‌ها تحت تأثیر عواملی مانند وزن مولکولی، درجه استیل‌زدایی و درصد کیتوزان است. همچنین، پارامترهای خارجی نظیر روش و شرایط اندازه‌گیری (رطوبت نسبی و دما)، اصلاح اثر شکاف هوا، و زمان و نحوه ذخیره‌سازی نیز بر این مقادیر تأثیرگذار هستند.

به‌طورکلی، وزن مولکولی، درجه استیل‌زدایی کیتوزان و نوع حلال مورد استفاده در تهیه محلول، تأثیر قابل‌توجهی بر میزان نفوذپذیری بخار آب ندارند [۴۰، ۲۹-۲۸، ۲۵]. بااین‌حال، نفوذپذیری بخار آب به وزن مولکولی وابسته است، به‌گونه‌ای که با افزایش وزن مولکولی کیتوزان، میزان نفوذپذیری بخار آب نیز افزایش می‌یابد [۷].

[1] Dimer
[2] Citric acid
[3] Barrier Properties

علاوه بر این، نفوذپذیری فیلم در طول زمان ذخیره‌سازی دچار تغییر می‌شود. داده‌های تجربی نشان داده‌اند که در دمای اتاق، نفوذپذیری بخار آب در فیلم‌های کیتوزان با وزن مولکولی بالا و پایین به‌مرور افزایش می‌یابد. این تغییرات ناشی از تغییرات ساختاری در ماکرومولکول‌های کیتوزان و کاهش حجم آزاد آن‌ها در طول ذخیره‌سازی است. باوجود کاهش حجم آزاد پلیمر، آرایش ماکرومولکول‌های کیتوزان از حالت تصادفی به حالتی منظم‌تر و گسترده‌تر تغییر می‌کند که همین امر موجب افزایش نفوذپذیری بخار آب می‌شود [۷].

نفوذپذیری اکسیژن معمولاً بر اساس روش استاندارد ASTM D-3935 اندازه‌گیری می‌شود [۴۳-۴۱، ۲۸]، اگرچه در برخی موارد می‌توان از استاندارد ASTM D-1434 نیز استفاده کرد [۳۱]. این ویژگی در فیلم‌های خوراکی به مکانیزم‌های موبینه‌ای مرتبط است و نفوذپذیری پایین اکسیژن، آن‌ها را برای بسته‌بندی مواد غذایی ایده‌آل می‌سازد. به‌ویژه، فیلم‌های کیتوزان خواص ممانعتی بسیار خوبی در برابر اکسیژن نشان می‌دهند. در مطالعات مختلف، مقادیر متنوعی از نفوذپذیری اکسیژن گزارش شده است که در جدول (۳) ارائه شده‌اند. عواملی همچون وزن مولکولی کیتوزان و نوع حلال مورد استفاده در تهیه محلول فیلم، بر این ویژگی در فیلم‌های خالص کیتوزان تأثیر می‌گذارند [۴۴، ۲۸، ۲۵]. مقادیر ارائه‌شده نشان می‌دهند که نفوذپذیری اکسیژن فیلم تحت تأثیر درجه استیل‌زدایی (DD)، وزن مولکولی (Mw)، نوع حلال، میزان کیتوزان موجود در فیلم و شرایط اندازه‌گیری متغیر است.

جدول (۱): مقادیر مختلفی از نفوذپذیری اکسیژن

ترکیب	اسید مورد استفاده	ویژگی‌های کیتوزان	شرایط	نفوذپذیری بخار آب(g/m s Pa)	منابع
کیتوزان ٪۲	استیک	DD ٪۹۵	۲۵ °C	(۱/۴-۵/۸) .۱۰ $^{-۸}$cc/m day atm	[۲۸]
	سیتریک			(۳/۳-۳/۰) . ۱۰ $^{-۸}$cc/m day atm	
	لاکتیک	Mw ۳۷۰- ۹۲۰ kDa	RH: 0%	(۲/۷-۲/۷) . ۱۰ $^{-۸}$cc/m day atm	
	مالئیک			(۰/۸ – ۱/۹) . ۱۰ $^{-۸}$cc/m day atm	
کیتوزان ٪۲	استیک	DD~ ٪۸۰	۲۷ °C	(۳۸/۰-۵۶/۰) ml/m^2/day atm	[۳۱]
		Mw: ۱۰۰ kDa	RH:٪۶۵		
کیتوزان ٪۱	استیک	High Mw	۲۳ °C	۶/۶۵ cm^3 µm/m^2 day kPa	[۲۵]
			RH:٪۵۰		
کیتوزان ٪۱	استیک	Low Mw	۲۳ °C	۷/۷۰ cm^3 µm/m^2 day kPa	[۲۵]
			RH:٪۵۰		

DD: درجه استیل‌زدایی، RH: رطوبت نسبی، Mw: وزن مولکولی

۲-۱-۳- خواص ضدمیکروبی

باتوجه‌به تمایل مصرف‌کنندگان به کاهش استفاده از مواد شیمیایی در افزایش ماندگاری مواد غذایی، توسعه فیلم‌های زیست‌پایه با خواص ضدمیکروبی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این مواد نه‌تنها به بهبود ایمنی و افزایش ماندگاری غذا کمک می‌کنند، بلکه جایگزینی طبیعی برای پلیمرهای ضدمیکروبی مصنوعی محسوب می‌شوند. استفاده از عوامل ضدمیکروبی طبیعی در بسته‌بندی مواد غذایی، راهکاری مؤثر برای حفظ کیفیت و جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها است، زیرا این ترکیبات با تماس مستقیم

فیلم یا پوشش با سطح غذا، اثرات محافظتی خود را اعمال می‌کنند [۴۵، ۴۶].

کیتوزان، یک پلیمر زیستی طبیعی مشتق‌شده از کیتین، به دلیل فعالیت ضدمیکروبی گسترده خود در مقابل انواع میکروارگانیسم‌ها، از جمله باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، قارچ‌ها و مخمرها، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۴۷]. این خاصیت تحت تأثیر عواملی مانند وزن مولکولی، درجه استیل‌زدایی، pH و قدرت یونی محیط قرار دارد. وزن مولکولی کیتوزان تأثیر مهمی بر خواص ضد میکروبی آن دارد، به‌طوری‌که کیتوزان با وزن مولکولی پایین، به دلیل حلالیت بیشتر، فعالیت ضد میکروبی قوی‌تری نشان می‌دهد، زیرا نفوذ به دیواره سلولی باکتری‌ها را تسهیل می‌کند [۴۸]. بر این، درجه استیل‌زدایی نیز نقش قابل‌توجهی دارد؛ کیتوزان با درجه استیل‌زدایی بالاتر، به دلیل افزایش چگالی گروه‌های آمینی پروتون‌شده که با سطح سلولی باکتری‌ها تعامل دارند، اثر ضد میکروبی قوی‌تری از خود نشان می‌دهد [۴۹].

کیتوزان از طریق چندین مکانیسم، اثرات ضدمیکروبی خود را اعمال می‌کند که مهم‌ترین آن‌ها شامل موارد زیر است:

اختلال در غشای سلولی: به دلیل ماهیت کاتیونی کیتوزان که از پروتون شدن گروه‌های آمینی آن در محیط اسیدی ناشی می‌شود، این ترکیب می‌تواند با سطح باکتری‌های دارای بار منفی تعامل کند. این تعامل موجب تغییر در نفوذپذیری غشای سلولی شده و با نشت اجزای درون‌سلولی، یکپارچگی غشا را مختل کرده و در نهایت منجر به مرگ سلول می‌شود [۵۰].

کلاته کردن مواد مغذی ضروری: کیتوزان قادر است به یون‌های فلزی حیاتی مانند کلسیم، منیزیم و آهن که برای رشد و سوخت وساز[1] باکتری‌ها ضروری هستند، متصل شود. این فرایند موجب مهار رشد باکتری‌ها و کاهش تشکیل بیوفیلم می‌شود و در نتیجه، توانایی باکتری‌ها برای مستعمره‌سازی سطوح و ایجاد عفونت را محدود می‌کند [۵۱].

اختلال در بیان ژن میکروبی: کیتوزان با نفوذ به داخل سلول‌های باکتریایی، می‌تواند با DNA و RNA تعامل کرده و بیان ژن و ساخت پروتئین را مهار کند. این فرایند در نهایت منجر به توقف رشد و مرگ باکتری می‌شود [۵۲].

تولید گونه‌های فعال اکسیژن: گزارش‌ها نشان می‌دهند که کیتوزان تولید گونه‌های فعال اکسیژن را در سلول‌های باکتریایی تحریک کرده و موجب اکسیداتیو[2]، آسیب DNA و مرگ سلولی می‌شود. این مکانیسم نقش مهمی در فعالیت ضدمیکروبی کیتوزان و مشتقات آن ایفا می‌کند [۵۳].

کیتوزان به دلیل توانایی در تشکیل فیلم و پوشش، یکی از پرکاربردترین عوامل ضدمیکروبی در بسته‌بندی مواد غذایی محسوب می‌شود. این بیوپلیمر در برابر طیف وسیعی از قارچ‌های رشته‌ای، مخمرها و باکتری‌های غذایی فعال است و بیشترین اثر مهاری آن بر روی مخمرها گزارش شده است [۵۴ و ۵۵].

مکانیسم‌های پیشنهادی برای عملکرد ضدمیکروبی کیتوزان عمدتاً بر اساس مطالعاتی است که در آن میکروارگانیسم‌ها به محیط‌های کشت مایع یا جامد حاوی کیتوزان اضافه شده‌اند. بااین‌حال، در مورد فیلم‌های کیتوزانی، مکانیسم مهارکننده به طور دقیق توضیح داده نشده است. علاوه بر این، باید تأثیر عوامل خارجی مانند شرایط بی‌هوازی یا خفگی نیز در نظر گرفته شود [۵۶]. همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که اثر ضدمیکروبی کیتوزان به ترکیب ماده غذایی بستگی دارد. حضور ترکیباتی مانند نشاسته، پروتئین‌ها، نمک (NaCl) و روغن می‌تواند بر میزان فعالیت ضدمیکروبی آن تأثیر بگذارد [۵۷]. در جدول ۲، خلاصه‌ای از گروه‌های باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، قارچ‌ها و مخمرهایی که برای بررسی اثر ضدمیکروبی فیلم‌های کیتوزانی مطالعه شده‌اند، ارائه شده است.

مطالعات متعددی اثرات ضدمیکروبی کیتوزان و مکانیسم عمل آن را بررسی کرده‌اند، نتایج نشان داد که این ترکیب قادر است از رشد طیف وسیعی از باکتری‌ها و قارچ‌ها جلوگیری کرده و مانع فساد مواد غذایی شود. این اثرات تحت‌تأثیر عواملی مانند وزن مولکولی، درجه استیل‌زدایی، pH، دما، شوری و سایر متغیرها قرار دارند که نقش مهمی در فعالیت ضدمیکروبی ایفا می‌کنند [۵۴]. کیتوزان در محیط‌های با pH پایین فعالیت ضد میکروبی قوی‌تری از خود نشان می‌دهد [۶۰]. همچنین، دما علاوه بر تأثیر بر رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها، بر میزان فعالیت ضد میکروبی کیتوزان نیز اثرگذار است. مطالعات نشان داده‌اند که حداقل غلظت مهاری در دماهای مختلف متفاوت است و فعالیت ضدباکتریایی کیتوزان با افزایش دما و کاهش pHتقویت می‌شود [۶۰]. همچنین مشخص شده است که pH می‌تواند تأثیر وزن مولکولی را تغییر دهد، بنابراین برای مقایسه دقیق نتایج بین مطالعات مختلف، گزارش دقیق پارامترهایی مانند pH، دما، وزن مولکولی و درجه استیل‌زدایی ضروری است.

[1] Metabolism

[2] Oxidative

جدول (۲): برخی از گروه‌های باکتری‌های گرم منفی، گرم مثبت، قارچ‌ها و مخمرهایی که برای مطالعه اثر آنتی‌میکروبی فیلم‌های کیتوزان استفاده شده‌اند.

میکروارگانیسم	مراجع
باکتری‌های گرم منفی	
سالمونلا انتریتیدیس	[۵۸]
پسودوموناس فلورسنس	[۵۷]
انتروباکتر آئروموناس	[۵۷]
فوتوباکتریوم فسفورهوم	[۵۷]
اشریشیا کلی	[۵۴]
پسودوموناس آئروژینوزا	[۵۴]
سالمونلا تایفی‌موریوم	[۵۴]
باکتری‌های گرم مثبت	
بروکوتریکس ترموفکتا	[۵۷]
لاکتوباسیلوس پلانتروم	[۵۷]
لاکتوباسیلوس کورواتوس	[۵۷]
پدیوکوکوس اسیدلاکتیکی	[۵۷]
باسیلوس سرئوس	[۵۷]
لیستریا مونوسیتوژنز	[۵۷]
لاکتوباسیلوس ساکئی	[۵۷]
استافیلوکوکوس اورئوس	[۵۶]
مخمرها	
کاندیدا لمبیکا	[۵۷]
قارچ‌ها	
کریپتوکوکوس هومیکولوس	[۵۷]
اسکلروتینیا اسکلروتیوم	[۵۶]
بوتریتیس سینره	[۵۹]
مونیلینیا فروتیکولا	[۵۶]
ریزوپوس استولونیفرا	[۵۶]
آسپرژیلوس نیگر	[۵۶]

۲-۱-۴- ویژگی‌های نوری

یکی از ویژگی‌های مهم بسته‌بندی مواد غذایی، محافظت از محصول در برابر نور، به‌ویژه اشعه ماورا بنفش (UV)، است. اشعه UV در محدوده ۲۰۰-۲۸۰ نانومتر [1] از عوامل اصلی اکسید شدن چربی‌ها محسوب می‌شود که این فرایند منجر به ایجاد طعم و بوی نامطلوب در مواد غذایی می‌گردد. بنابراین، توسعه فیلم‌های بسته‌بندی با خاصیت سدکنندگی مؤثر در برابر نور UV می‌تواند روند اکسیداسیون چربی‌ها را کاهش داده، عمر ماندگاری محصولات غذایی را افزایش دهد و درعین‌حال کیفیت آن‌ها را حفظ کند [۶۱]. علاوه بر این، شفافیت یکی از پارامترهای کلیدی بسته‌بندی است که تأثیر مستقیمی بر پذیرش مصرف‌کنندگان دارد. افراد اغلب بسته‌بندی‌های شفاف را ترجیح می‌دهند تا بتوانند محتوا و کیفیت بصری محصول را مشاهده کنند. بنابراین، طراحی فیلم‌هایی که هم سدکنندگی مناسبی در برابر اشعه UV داشته باشند و هم شفافیت کافی ارائه دهند، برای جلب رضایت مصرف‌کننده و حفظ کیفیت محصول ضروری است [۶۲].

طیف-UV مرئی فیلم‌های خالص کیتوزان نشان می‌دهد که این فیلم‌ها در محدوده مرئی (۴۰۰-۷۰۰ نانومتر) دارای عبوردهی ۹۳-۸۸ درصد هستند که آن‌ها را به موادی با شفافیت اپتیکی بالا تبدیل می‌کند [۶۲]. علاوه بر این، فیلم‌های کیتوزانی قابلیت جذب قابل توجهی در برابر اشعه UV دارند، به‌ویژه در بازه ۲۸۰-۲۷۰ نانومتر، که این ویژگی به حضور پیوندهای غیراشباع، به‌ویژه پیوندهای C–O در ساختار کیتوزان نسبت داده می‌شود [۶۴-۶۳، ۶۱]. بنابراین، در توسعه پلیمرهای جدید بر پایه کیتوزان، لازم است این خواص نوری در ترکیب با سایر اجزا در نظر گرفته شود تا موادی با عملکرد بهینه در زمینه بسته‌بندی و سایر کاربردهای صنعتی ایجاد گردد.

۳- نتیجه‌گیری

باتوجه‌به بررسی‌های انجام‌شده، کیتوزان به‌عنوان یک پلیمر زیستی با قابلیت‌های مکانیکی، ممانعتی، ضدمیکروبی و نوری برجسته، گزینه‌ای مناسب برای توسعه بسته‌بندی‌های فعال و زیست‌پایه محسوب می‌شود. خواص مکانیکی مطلوب این فیلم‌ها امکان استفاده آن‌ها در شرایط مختلف حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی را فراهم می‌کند، درحالی‌که ویژگی‌های ممانعتی آن‌ها می‌تواند به حفظ کیفیت مواد غذایی کمک کند. علاوه بر این، خاصیت ضدمیکروبی قوی کیتوزان علیه طیف گسترده‌ای از میکروارگانیسم‌ها، نقش مؤثری در افزایش ماندگاری و ایمنی مواد غذایی ایفا می‌کند. توانایی این پلیمر در جذب اشعه ماورا بنفش و شفافیت بالای آن، از دیگر مزایای آن در بسته‌بندی‌های زیست‌پایه به شمار می‌آید. در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که فیلم‌های مبتنی بر کیتوزان، به‌ویژه در ترکیب با سایر مواد تقویت‌کننده، می‌توانند جایگزینی مناسب برای بسته‌بندی‌های سنتی نفت‌پایه باشند و نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از ضایعات پلاستیکی ایفا کنند. تحقیقات آینده می‌توانند بر بهینه‌سازی فرمولاسیون [2] این فیلم‌ها برای بهبود عملکرد

[1] Nanometer (nm)

[2] Formulation

مکانیکی و ممانعتی آن‌ها تمرکز کنند تا امکان استفاده گسترده‌تر از آن‌ها در صنعت بسته‌بندی فراهم شود.

۴- مراجع

[1] A. Khan, H. Gallah, B. Riedl, J. Bouchard, A. Safrany, and M. Lacroix, "Genipin cross-linked antimicrobial nanocomposite films and gamma irradiation to prevent the surface growth of bacteria in fresh meats," Innovative Food Science & Emerging Technologies, vol. 35, pp. 96–102, 2016. doi: 10.1016/j.ifset.2016.03.011.

[2] T. D. Moshood, G. Nawanir, F. Mahmud, F. Mohamad, M. H. Ahmad, and A. AbdulGhani, "Sustainability of biodegradable plastics: New problem or solution to solve the global plastic pollution?," Current Research in Green and Sustainable Chemistry, vol. 5, p. 100273, 2022. doi: 10.1016/j.crgsc.2022.100273.

[3] P. Cazón and M. Vázquez, "Applications of chitosan as food packaging materials," Sustainable Agriculture Reviews, vol. 36, pp. 81–123, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-16581-9_3.

[4] S. K. Verma, A. Prasad, and Sonika, "State of art review on sustainable biodegradable polymers with a market overview for sustainability packaging," Materials Today Sustainability, vol. 100776, 2024. doi: 10.1016/j.mtsust.2024.100776.

[5] M. Mujtaba, J. Lipponen, M. Ojanen, S. Puttonen, and H. Vaittinen, "Trends and challenges in the development of bio-based barrier coating materials for paper/cardboard food packaging; a review," Science of the Total Environment, vol. 851, p. 158328, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158328.

[6] A. Kumar, R. K. Deshmukh, and K. K. Gaikwad, "Quality preservation in banana fruits packed in pine needle and halloysite nanotube-based ethylene gas scavenging paper during storage," Biomass Conversion and Biorefinery, vol. 14, no. 5, pp. 6311–6320, 2024. doi: 10.1007/s13399-022-02708-6.

[7] G. Kerch and V. Korkhov, "Effect of storage time and temperature on structure, mechanical and barrier properties of chitosan-based films," European Food Research and Technology, vol. 232, pp. 17–22, 2011. doi: 10.1007/s00217-010-1356-x.

[8] P. Cazón, G. Velázquez, J. A. Ramírez, and M. Vázquez, "Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review," Food Hydrocolloids, vol. 68, pp. 136–148, 2017. doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.09.009.

[9] M. Z. Elsabee and E. S. Abdou, "Chitosan based edible films and coatings: A review," Materials Science and Engineering: C, vol. 33, no. 4, pp. 1819–1841, 2013. doi: 10.1016/j.msec.2013.01.010.

[10] J. Wróblewska-Krepsztul, T. Rydzkowski, G. Borowski, M. Szczypiński, T. Klepka, and V. K. Thakur, "Recent progress in biodegradable polymers and nanocomposite-based packaging materials for sustainable environment," International Journal of Polymer Analysis and Characterization, vol. 23, no. 4, pp. 383–395, 2018. doi: 10.1080/1023666X.2018.1455382.

[11] M. Lei, W. Huang, J. Sun, Z. Shao, W. Duan, T. Wu, Y. Wang, and X. Zhang, "Synthesis, characterization, and performance of carboxymethyl chitosan with different molecular weight as additive in water-based drilling fluid," Journal of Molecular Liquids, vol. 310, p. 113135, 2020. doi: 10.1016/j.molliq.2020.113135.

[12] S. Kumar, A. Mukherjee, and J. Dutta, "Chitosan based nanocomposite films and coatings: Emerging antimicrobial food packaging alternatives," Trends in Food Science & Technology, vol. 97, pp. 196–209, 2020. doi: 10.1016/j.tifs.2020.01.002.

[13] B. Tyliszczak, A. Drabczyk, S. Kudłacik-Kramarczyk, and K. Rudnicka, "In vitro biosafety of pro-ecological chitosan-based hydrogels modified with natural substances," Journal of Biomedical Materials Research Part A, vol. 107, no. 11, pp. 2501–2511, 2019. doi: 10.1002/jbm.a.36756.

[14] Z. Shariatinia, "Pharmaceutical applications of chitosan," Advances in Colloid and Interface Science, vol. 263, pp. 131–194, 2019. doi: 10.1016/j.cis.2018.11.008.

[15] H. Wang, J. Qian, and F. Ding, "Emerging chitosan-based films for food packaging applications," Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 66, no. 2, pp. 395–413, 2018. doi:10.1021/acs.jafc.7b04528.

[16] M. Hosseinnejad and S. M. Jafari, "Evaluation of different factors affecting antimicrobial properties of chitosan," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 85, pp. 467–475, 2016. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.01.022.

[17] D. R. Perinelli, L. Fagioli, R. Campana, J. K. W. Lam, W. Baffone, G. F. Palmieri, L. Casettari, and G. Bonacucina, "Chitosan-based nanosystems and their exploited antimicrobial activity," European Journal of Pharmaceutical Sciences, vol. 117, pp. 8–20, 2018. doi: 10.1016/j.ejps.2018.01.046.

[18] B. T. Iber, N. A. Kasan, D. Torsabo, and J. W. Omuwa, "A review of various sources of chitin and chitosan in nature," Journal of Renewable Materials, vol. 10, no. 4, pp. 1097–1123, 2022. doi: 10.32604/jrm.2022.018142.

[19] A. Chenite, M. Buschmann, D. Wang, C. Chaput, and N. Kandani, "Rheological characterization of thermogelling chitosan/glycerol-phosphate solutions," Carbohydrate Polymers, vol. 46, no. 1, pp. 39–47, 2001. doi: 10.1016/S0144-8617(00)00281-2.

[20] L. Zhang, Y. Mao, J. Cai, J. Zhou, and T. Kondo, "Effects of coagulation conditions on the properties of multifilament fibers based on dissolution of cellulose in NaOH/urea aqueous solution," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 47, no. 22, pp. 8676–8683, 2008. doi: 10.1021/ie800833w.

[21] W. Zhang and W. Xia, "Dissolution and stability of chitosan in a sodium hydroxide/urea aqueous solution," Journal of Applied Polymer Science, vol. 131, no. 3, p. 39819, 2014. doi: 10.1002/app.39819.

[22] M. Fan and Q. Hu, "Chitosan-LiOH-urea aqueous solution—a novel water-based system for chitosan processing," Carbohydrate Research, vol. 344, no. 7, pp. 944–947, 2009. doi: 10.1016/j.carres.2009.03.002.

[23] E. V. R. Almeida, E. Frollini, A. Castellan, and V. Coma, "Chitosan, sisal cellulose, and biocomposite chitosan/sisal cellulose films prepared from thiourea/NaOH aqueous solution," Carbohydrate Polymers, vol. 80, no. 3, pp. 655–664, 2010. doi: 10.1016/j.carbpol.2009.10.039.

[24] C. A. Campos, L. N. Gerschenson, and S. K. Flores, "Development of edible films and coatings with antimicrobial activity," Food and Bioprocess Technology, vol. 4, no. 6, pp. 849–875, 2011. doi: 10.1007/s11947-010-0434-1.

[25] I. Leceta, P. Guerrero, and K. de la Caba, "Functional properties of chitosan-based films," Carbohydrate Polymers, vol. 93, no. 1, pp. 339–346, 2013. doi: 10.1016/j.carbpol.2012.04.031.

[26] M. Rouhi, S. H. Razavi, and S. M. Mousavi, "Optimization of crosslinked poly(vinyl alcohol) nanocomposite films for mechanical properties," Materials Science and Engineering: C, vol. 71, pp. 1052–1063, 2017. doi: 10.1016/j.msec.2016.11.135.

[27] M. L. Spotti, J. P. Cecchini, M. J. Spotti, and C. R. Carrara, "Brea gum (from Cercidium praecox) as a structural support for emulsion-based edible films," LWT - Food Science and Technology, vol. 68, pp. 127–134, 2016. doi: 10.1016/j.lwt.2015.12.018.

[28] S. Y. Park, K. S. Marsh, and J. W. Rhim, "Characteristics of different molecular weight chitosan films affected by the type of organic solvents," Journal of Food Science, vol. 67, no. 1, pp. 194–197, 2002. doi: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb11382.x.

[29] M. J. Bof, F. A. Cabrera, and M. C. Gerschenson, "Chitosan molecular weight effect on starch-composite film properties," Food Hydrocolloids, vol. 51, pp. 281–294, 2015. doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.05.013.

[30] K. M. Kim, S. H. Lim, and S. J. Park, "Properties of chitosan films as a function of pH and solvent type," Journal of Food Science, vol. 71, no. 3, pp. E119–E124, 2006. doi: 10.1111/j.1365-2621.2006.tb08983.x.

[31] P. C. Srinivasa, S. Raghavan, and K. J. Sharma, "Properties of chitosan films prepared under different drying conditions," Journal of Food Engineering, vol. 63, no. 1, pp. 79–85, 2004. doi: 10.1016/S0260-8774(03)00211-0.

[32] L. S. Devi, A. K. Sharma, and R. K. Singh, "Lipid incorporated biopolymer-based edible films and coatings in food packaging: A

[50] R. C. Goy, D. de Britto, and O. B. G. Assis, "A review of the antimicrobial activity of chitosan," Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, no. 3, pp. 241–247, 2009. doi: 10.1590/S0104-14282009000300013.
[51] G. Sahariah and M. Másson, "Antimicrobial chitosan and chitosan derivatives: a review of the structure–activity relationship," Biomacromolecules, vol. 18, no. 11, pp. 3846–3868, 2017. doi: 10.1021/acs.biomac.7b01034.
[52] H. Yilmaz Atay, "Antibacterial activity of chitosan-based systems," in Functional Chitosan: Drug Delivery and Biomedical Applications, Elsevier, 2019, pp. 457–489. doi: 10.1016/B978-0-12-814907-7.00015-1.
[53] Q. Xia, X. Wang, Q. Zeng, D. Guo, Z. Zhu, H. Chen, and H. Dong, "Mechanisms of enhanced antibacterial activity by reduced chitosan-intercalated nontronite," Environmental Science & Technology, vol. 54, no. 8, pp. 5207–5217, 2020. doi: 10.1021/acs.est.9b07185.
[54] I. M. Helander, E.-L. Nurmiaho-Lassila, R. Ahvenainen, J. Rhoades, and S. Roller, "Chitosan disrupts the barrier properties of the outer membrane of Gram-negative bacteria," International Journal of Food Microbiology, vol. 71, no. 2–3, pp. 235–244, 2001. doi: 10.1016/s0168-1605(01)00609-2.
[55] O. M. Khubiev, A. R. Egorov, A. A. Kirichuk, V. N. Khrustalev, A. G. Tskhovrebov, and A. S. Kritchenkov, "Chitosan-based antibacterial films for biomedical and food applications," International Journal of Molecular Sciences, vol. 24, no. 13, p. 10738, 2023. doi: 10.3390/ijms241310738.
[56] A. P. Martínez-Camacho, M. O. Cortez-Rocha, J. M. Ezquerra-Brauer, A. Z. Graciano-Verdugo, F. Rodríguez-Félix, M. M. Castillo-Ortega, M. S. Yépiz-Gómez, and M. Plascencia-Jatomea, "Chitosan composite films: Thermal, structural, mechanical and antifungal properties," Carbohydrate Polymers, vol. 82, no. 2, pp. 305–315, 2010. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.04.069.
[57] F. Devlieghere, A. Vermeulen, and J. Debevere, "Chitosan: Antimicrobial activity, interactions with food components and applicability as a coating on fruit and vegetables," Food Microbiology, vol. 21, no. 6, pp. 703–714, 2004. doi: 10.1016/j.fm.2004.02.003.
[58] A. M. Durango, N. F. F. Soares, S. Benevides, J. Teixeira, M. Carvalho, and C. Wobeto, "Development and evaluation of an edible antimicrobial film based on yam starch and chitosan," Packaging Technology and Science, vol. 19, no. 1, pp. 55–59, 2006. doi: 10.1002/pts.713.
[59] G. Romanazzi, F. Nigro, A. Ippolito, and D. DiVenere, "Effects of pre- and postharvest chitosan treatments to control storage grey mold of table grapes," Journal of Food Science, vol. 67, no. 5, pp. 1862–1867, 2002. doi: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb08737.x.
[60] A. A. Tayel, S. Moussa, K. Opwis, D. Knittel, E. Schollmeyer, and A. Nickisch-Hartfiel, "Inhibition of microbial pathogens by fungal chitosan," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 47, no. 1, pp. 10–14, 2010. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2010.04.005.
[61] P. Cazón, M. Vázquez, and G. Velázquez, "Composite films of regenerated cellulose with chitosan and polyvinyl alcohol: Evaluation of water adsorption, mechanical and optical properties," Int. J. Biol. Macromol., vol. 117, pp. 235–246, 2018. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.05.148.
[62] C. Vilela, R. J. B. Pinto, J. Coelho, M. R. M. Domingues, S. Daina, P. Sadocco, S. A. O. Santos, and C. S. R. Freire, "Bioactive chitosan/ellagic acid films with UV-light protection for active food packaging," Food Hydrocoll., vol. 73, pp. 120–128, 2017. doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.06.037.
[63] S. Hajji, A. Chaker, M. Jridi, H. Maalej, K. Jellouli, S. Boufi, and M. Nasri, "Structural analysis, and antioxidant and antibacterial properties of chitosan-poly (vinyl alcohol) biodegradable films," Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 23, no. 15, pp. 15310–15320, 2016. doi: 10.1007/s11356-016-6699-9.
[64] V. G. L. Souza, A. L. Fernando, J. R. A. Pires, P. F. Rodrigues, A. A. S. Lopes, and F. M. B. Fernandes, "Physical properties of chitosan films incorporated with natural antioxidants," Ind. Crops Prod., vol. 107, pp. 565–572, 2017. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.04.056.
review," Current Research in Food Science, vol. 7, p. 100720, 2024. doi: 10.1016/j.crfs.2024.100720.
[33] V. Siracusa, P. Rocculi, S. Romani, and M. D. Rosa, "Biodegradable polymers for food packaging: A review," Trends in Food Science & Technology, vol. 19, no. 12, pp. 634–643, 2008. doi: 10.1016/j.tifs.2008.07.003.
[34] M. Aider, "Chitosan application for active bio-based films production and potential in the food industry," LWT - Food Science and Technology, vol. 43, no. 6, pp. 837–842, 2010. doi: 10.1016/j.lwt.2010.01.021.
[35] W. Xue, J. Zhu, P. Sun, F. Yang, H. Wu, and W. Li, "Permeability of biodegradable film comprising biopolymers derived from marine origin for food packaging application: A review," Trends in Food Science & Technology, vol. 136, pp. 295–307, 2023. doi: 10.1016/j.tifs.2023.05.001.
[36] E. Ayranci and S. Tunc, "A method for the measurement of the oxygen permeability and the development of edible films to reduce the rate of oxidative reactions in fresh foods," Food Chemistry, vol. 80, no. 3, pp. 423–431, 2003. doi: 10.1016/S0308-8146(02)00485-5.
[37] M. R. Gal, M. Rahmaninia, and M. A. Hubbe, "A comprehensive review of chitosan applications in paper science and technologies," Carbohydrate Polymers, vol. 309, p. 120665, 2023, doi: 10.1016/j.carbpol.2023.120665.
[38] P. C. Srinivasa, R. M. N. Ramesh, and R. N. Tharanathan, "Effect of plasticizers and fatty acids on mechanical and permeability characteristics of chitosan films," Food Hydrocolloids, vol. 21, no. 7, pp. 1113–1122, 2007. doi: 10.1016/j.foodhyd.2006.08.008.
[39] J. Li, S. Zivanovic, P. M. Davidson, and K. Kit, "Characterization and comparison of chitosan/PVP and chitosan/PEO blend films," Carbohydrate Polymers, vol. 79, no. 3, pp. 786–791, 2010. doi: 10.1016/j.carbpol.2009.09.015.
[40] J. L. Wiles, R. J. Vergano, and D. R. Testin, "Water vapor transmission rates and sorption behavior of chitosan films," Journal of Food Science, vol. 65, no. 7, pp. 1175–1179, 2000. doi: 10.1111/j.1365-2621.2000.tb10261.x.
[41] H. J. Park, C. L. Weller, P. J. Vergano, and R. F. Testin, "Permeability and mechanical properties of cellulose-based edible films," Journal of Food Science, vol. 58, no. 6, pp. 1361–1364, 1993. doi: 10.1111/j.1365-2621.1993.tb06183.x.
[42] J. Vartiainen, R. Motion, H. Kulonen, M. Rättö, E. Skyttä, and R. Ahvenainen, "Chitosan-coated paper: Effects of nisin and different acids on the antimicrobial activity," Journal of Applied Polymer Science, vol. 94, no. 3, pp. 986–993, 2004. doi: 10.1002/app.20701.
[43] M. P. Souza, L. A. M. R. Souza, and M. V. C. A. Lima, "Development and characterization of an active chitosan-based film containing quercetin," Food Bioprocess Technology, vol. 8, pp. 2183–2191, 2015. doi: 10.1007/s11947-015-1672-6.
[44] C. Valenzuela, L. Abugoch, and C. Tapia, "Quinoa protein–chitosan–sunflower oil edible film: Mechanical, barrier and structural properties," LWT - Food Science and Technology, vol. 50, no. 2, pp. 531–537, 2013. doi: 10.1016/j.lwt.2012.08.010.
[45] M. D. R. Moreira, S. I. Roura, and A. Ponce, "Effectiveness of chitosan edible coatings to improve microbiological and sensory quality of fresh cut broccoli," LWT - Food Science and Technology, vol. 44, no. 10, pp. 2335–2341, 2011. doi: 10.1016/j.lwt.2011.04.010.
[46] L. A. M. van den Broek, J. R. I. Knoop, F. H. J. Kappen, and C. G. Boeriu, "Chitosan films and blends for packaging material," Carbohydrate Polymers, vol. 116, pp. 237–242, 2015. doi: 10.1016/j.carbpol.2014.07.039.
[47] H. El Knidri, A. Laajeb, and A. Lahsini, "Chitin and chitosan: Chemistry, solubility, fiber formation, and their potential applications," in Handbook of Chitin and Chitosan, S. Thomas, Ed., Elsevier, 2020, pp. 35–57. doi: 10.1016/C2018-0-03014-5.
[48] N. C. Minh, S. Gopi, and A. Pius, "Preparation, properties, and application of low-molecular-weight chitosan," in Handbook of Chitin and Chitosan, Elsevier, 2020, pp. 453–471. doi: 10.1016/B978-0-12-817970-3.00015-9.
[49] E. I. Akpan, S. Gopi, and A. Pius, "Solubility, degree of acetylation, and distribution of acetyl groups in chitosan," in Handbook of Chitin and Chitosan, Elsevier, 2020, pp. 131–164. doi: 10.1016/B978-0-12-817970-3.00007-X.