



The Trends and Challenges of Starch and Cellulose-Based Foams are Expanded as Polystyrene Competitors

Narges Jannatiha, Naser Sedaghat *, Seyed Mohammad Ali Razavi

*Professor, Department of Food Sciences and Technology, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 08/10/2023, Revised: 17/12/2023, Accepted: 14/05/2024, Published: 09/06/2024)

DOR:20.1001.1.22286675.1403.15.57.4.3

ABSTRACT

Expanded Styrene is an inexpensive, readily available polymer used in packaging foams. With this, foams created on polystyrene cause environmental problems because they are non-degradable and have little recycling. Therefore, foams with energy sources are necessary for degradable production packaging and to deal with plastic issues. This review emphasizes different strategies of starch-based manufacturing, modification of starch-based foams to improve mechanical properties and durability concerning humidity, biodegradable foams based on cellulose in anno to improve mechanical and thermal properties and related challenges in the development of bioplastic aimed at using them as alternatives to polystyrene in packaging. Starch source, process conditions, type of fiber and addition of other polymers, compatibility between composite components affect foam porosity, mechanical properties and morphology. In addition, these materials have positive environmental benefits and are desirable to be recycled. If these materials are to be increasingly sustainable and the challenges in their production and application due to the reduction of the effects of auxiliary plastic materials, performance characteristics such as durability, strength and low price can be considered for the use of these products. Therefore, study and investigation in the field of foams based on degradable biological materials with suitable properties.

Keywords: Bio Foam .Starch .Cellulose, Biodegradable

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

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



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

علمی - مروری

روندها و چالش‌های فوم‌های بر پایه نشاسته و سلولز به‌عنوان جایگزین‌های رقابتی پلی استایرن منبسط‌شده

نرجس جنتی‌ها^۱، ناصر صداقت^{۲*} ID، سید محمدعلی رضوی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران ۳ و ۲- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.57.4.3

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

چکیده

پلی استایرن منبسط‌شده یک پلیمر ارزان است و به‌طور گسترده‌ای در دسترس است و در فوم‌های بسته‌بندی بکار می‌رود. با این حال فوم‌های مبتنی بر پلی استایرن منبسط‌شده باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی می‌شوند زیرا تجزیه‌ناپذیر بوده و بازیافت کمی دارند. بنابراین، تولید فوم‌هایی با منابع تجدید پذیر با کاربرد در بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر و همچنین برای مقابله با مسائل آلودگی پلاستیک‌ها ضروری است. این بررسی تأکید بر راهبردهای متفاوت فرآیند ساخت و اصلاح فوم‌های بر پایه نشاسته به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و ممانعتی نسبت به رطوبت، فوم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه سلولز در مقیاس نانو جهت بهبود خواص مکانیکی و حرارتی و چالش‌های مرتبط در توسعه پلاستیک‌های زیستی دارد که با هدف بکارگیری آن‌ها به‌عنوان جایگزین‌های رقابتی با پلی استایرن منبسط‌شده در بسته‌بندی هست. منبع نشاسته، شرایط فرآیند کردن، نوع فیبر و افزودن سایر پلیمرها، سازگاری بین اجزای کامپوزیت، بر میزان تخلخل فوم، خواص مکانیکی و ریزساختار آن‌ها تأثیرگذار است. علاوه بر این، این مواد دارای مزایای زیست‌محیطی مثبت و قابلیت بازیافت مطلوب می‌باشند. اگر قرار باشد این مواد به‌طور فزاینده‌ای پایدار باشند و به کاهش اثرات منفی ناشی از زباله‌های پلاستیکی کمک کنند باید چالش‌های موجود در تولید و کاربرد آن‌ها را برطرف نماییم از جمله این چالش‌ها می‌توان ویژگی‌های عملکردی مانند دوام، استحکام و قیمت پایین برای استفاده از این محصولات در مقیاس بالا را اشاره نمود. بنابراین مطالعه و بررسی در زمینه فوم‌های بر پایه مواد زیست‌تخریب‌پذیر با خواص مناسب ضروری است.

کلیدواژه‌ها: بیوفوم، نشاسته، سلولز، زیست‌تخریب‌پذیر

۱- مقدمه

توسعه فناوری پلیمر فواید زیادی را برای انسان به ارمغان آورده است و امروزه به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان محصولات پلیمری، پلی استایرن منبسط‌شده یک ماده پلیمری است که از منابع غیرقابل تجدید به دست می‌آید و برای ساختار فوم به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد فوم پلی استایرن یکی از پرمصرف‌ترین پلاستیک‌ها به دلیل چگالی بالا و هزینه کم به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

در سال‌های اخیر مصرف اقلام پلاستیکی ساخته‌شده از مواد پلیمری با منشأ مواد نفتی نسبت به گذشته افزایش یافته است در سال ۲۰۱۶ تولید جهانی پلاستیک به مرز ۳۹۶ میلیون تن رسید.

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



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

پلیمر مصنوعی محلول در آب است که در حضور میکروارگانیزم‌های انتخابی آسیب‌پذیر است. توانایی آن برای ساخت یک ماتریس پلیمری کاملاً تعریف‌شده و حلالیت بالا در آب یا سایر حلال‌های آلی کاربردی، توجه گسترده بسیاری از صنایع را به خود جلب کرده است [۷]. سایر مواد پلیمری مانند پلی (لاکتیک اسید)، پلی یورتان و غیره نیز به بخش اساسی بازار فوم‌های زیست‌تخریب‌پذیر تبدیل شده‌اند [۸]، [۶]، [۹].

هدف از این مطالعه بررسی فوم‌های بر پایه ترکیبات زیستی مانند نشاسته و سلولز و استفاده از روش‌های مختلف برای تهیه فوم‌های زیستی است.

۲- فوم‌های بر پایه نشاسته

فوم‌های بر پایه نشاسته را می‌توان به‌طور گسترده در بسته بندی فوم‌های زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط‌زیست و کاربردهای سرو غذا استفاده کرد بنابراین، فناوری‌های مختلفی برای تولید فوم‌های بر پایه نشاسته به‌عنوان جایگزین پلی استایرن آغاز شده است. روش‌های مختلف پردازش فوم‌های بر پایه نشاسته، اصلاح آن‌ها با استفاده از افزودنی‌های مختلف، ایفای طبیعی، نشاسته اصلاح‌شده، سایر پلیمرهای زیستی، نانو پرکننده‌ها و غیره، خواص فوم‌های کامپوزیتی مبتنی بر نشاسته، چالش‌ها روبرو در توسعه پلاستیک‌های زیستی، مسیریابی جدید برای به دست آوردن پلاستیک‌های زیستی و پیشرفت در این صنعت به‌تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۲-۱- نشاسته

نشاسته به شکل کربوهیدرات در گیاهان عالی ذخیره می‌شود. مزایای آن شامل مقرون‌به‌صرفه بودن، تجدیدپذیری و زیست‌تخریب‌پذیری است [۱۰]. نشاسته به‌صورت گرانول (بسته‌های کوچک، متراکم و مجزا) وجود دارد که در آب سرد نامحلول هستند. آمیلوز و آمیلوپکتین دو پلیمر اصلی نشاسته هستند. آمیلوز یک پلیمر خطی با پیوند (۱-۴) واحدهای آلفا-گلوکوپیرانوزیل تشکیل شده‌اند، در حالی که آمیلوپکتین با پیوند (۱-۴) واحدهای د-آلفا-گلوکوپیرانوزیل توسط پیوندهای شاخه‌ای (۱-۶) تشکیل شده‌اند تا پلیمر بسیار شاخه‌دار آمیلوپکتین را تشکیل دهند. آمیلوز کوچک‌تر، دارای وزن مولکولی بین ۱۰۴ تا ۱۰۵ و درجه پلیمریزاسیون ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ است. آمیلوپکتین دارای وزن مولکولی بین ۱۰۶ تا ۱۰۸ و درجه پلیمریزاسیون در حدود ۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ است [۱۱]. زنجیره‌های آمیلوپکتین در درجه اول مسئول بلورینگی نشاسته

با این حال استفاده از این مواد منجر به مشکلات جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان شده است. تحقیقات متعددی در مورد مواد پلاستیکی جدید از بیوپلیمر خالص تا اختلاط به یو پلیمر با پلیمرهای مصنوعی انجام شده است. یکی از راه‌حل‌ها برای مقابله با مشکل پلاستیک‌ها توسعه پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر است. ارائه پلیمرهای زیستی یک جایگزین امیدوارکننده برای پلاستیک‌های بر پایه مواد نفتی است و با انتخاب دقیق بیوپلیمر مناسب و تنظیم فرآیند می‌توان به خواص و رقابت عملکردی با پلاستیک‌های ساخته‌شده از مواد نفتی دست‌یافت. برای این منظور، ایفای طبیعی و کامپوزیت‌های ایفای طبیعی با پلیمرهای سازگار با محیط‌زیست توجه گسترده بسیاری از صنایع را به خود جلب کرد. [۲]، [۳]

ایفای طبیعی به دلیل هزینه کم، زیست‌تخریب‌پذیری، فراوانی و ویژگی‌های خاص به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک ماده تقویت‌کننده در تر موست و ترموپلاستیک‌ها استفاده می‌شود. فوم‌های مبتنی بر نشاسته، فوم‌های پلیمری طبیعی هستند که به دلیل در دسترس بودن زیاد و هزینه کم، کاربرد زیادی دارند [۴]. خواص عملکردی فوم‌های نشاسته مانند کشش، چگالی، هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی و جذب رطوبت عمدتاً به روش ساخت و افزودنی‌های آب‌گریز بستگی دارد که ریزساختار محصولات را کنترل می‌کنند [۵]. با این حال، ماهیت مرطوب و شکننده فوم‌های بر پایه نشاسته خالص، کاربرد آن را در بسیاری از زمینه‌ها محدود می‌کند. به‌منظور افزایش خواص آب‌گریزی و مکانیکی فوم‌های بر پایه نشاسته، آن‌ها را با مواد مختلف زیستی مانند سلولز و پلیمرهای دیگر برای حفظ ماهیت زیست‌تخریب‌پذیر مخلوط می‌کنند.

سلولز فراوان‌ترین هموپلیمر به‌عنوان عامل تقویت‌کننده در پلیمرهای زیستی استفاده می‌شود فراوانی گسترده ایفای سلولز طبیعی (یک پلی سا کارید تجدیدپذیر استخراج‌شده از خمیر چوب به همراه خواص حرارتی و مکانیکی خوب) آن را به یک ماده زیست‌تخریب‌پذیر عالی برای تولید فوم تبدیل می‌کند. خواص مکانیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برجسته آن، تطبیق‌پذیری این ماده را در کاربردهای مختلف زیست‌پزشکی از جمله داربست‌های مهندسی بافت، وسایل نقلیه دارورسانی و کاربردهای آزمایشگاهی نشان می‌دهد [۶]. پلی وینیل الکل یک

پراش اشعه ایکس ارائه دهند. به طور کلی نشاسته کاساوا شامل ۹۰ درصد نوع A و ۱۰ درصد نوع B است. اینجیل و همکاران [۱۹] فوم های زیست تخریب پذیر نشاسته آمیخته با ساقه انگور برای بسته بندی مواد غذایی را بررسی نمودند. نشاسته کاساوا قله نسبتاً وسیعی را در $2\theta = 15, 17, 22/7$ نشان داد این قله ها مخلوطی از بلورهای نوع A ($2\theta = 15, 22/7$) و نوع B ($2\theta = 15$) بود. الگوی پراش اشعه ایکس ساقه انگور دارای شدت کم اما گستردگی پیک در $2\theta = 21$ بود که ممکن است مربوط به بلورینگی باقیمانده سلولز (از اجزای اصلی ساقه انگور) باشد.

۲-۲- فرآیند فوم های بر پایه نشاسته

۲-۲-۱- اکستروژن

علاقه قابل توجهی به استفاده از فوم های بر پایه نشاسته در صنعت بسته بندی مواد غذایی در سال های اخیر وجود دارد و در درجه اول از اکستروژن نشاسته برای فرآوری آن استفاده می شود [۹]. در فرآیند اکستروژن، حفره های خالی در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی گراد ایجاد می شود، زیرا بخار در طول اکستروژن در شرایط فشار بالای قالب منبسط می شود. شرایط اکستروژن مانند دمای محفظه، قطر قالب، سرعت پیچ، ترکیبات مواد مانند نوع نشاسته، غلظت عامل هسته زایی، رطوبت خوراک و غیره، ساختار فوم نشاسته اکستروژن شده را تعیین می کنند [۲۰]. سرعت پیچ و دمای محفظه مورد استفاده اغلب در محدوده $400-700$ دور در دقیقه و $170-120$ درجه سانتی گراد در اکستروژن فوم مبتنی بر نشاسته بکار می رود آب به عنوان یک عامل دمنده مؤثر و همچنین یک نرم کننده قابل توجه برای فوم های مبتنی بر نشاسته عمل می کند [۲۱]. برای ارائه بیشترین نسبت انبساط فوم های اکستروژن شده، محتوای آب در خوراک در محدوده بهینه ۱۵-۱۸ درصد نگه داشته می شود [۲۲]. تالک معمولاً در فوم های مبتنی بر نشاسته به عنوان یک عامل هسته زایی معدنی مؤثر استفاده می شود که مکان های هسته زایی کافی را برای تبخیر آب فراهم می کند. اندازه سلول کوچک تر و توزیع اندازه سلول باریک تر می شود و اندازه سلول با افزایش محتوای تالک کوچک تر می شود [۹] نوع نشاسته نیز به دلیل منبع گیاهی، نسبت آمیلوز و آمیلوپکتین، منحصر به فرد بودن ابعاد دانه و غیره، ساختار کف را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می دهد [۲۳].

ژانگ و همکاران [۲۴] با استفاده از روش اکستروژن و پوشش دهی، به بررسی فوم های نشاسته و پلی وینیل آمید که در

هستند، در حالی که آمیلوز در ساختار بی شکل وجود دارد. نشاسته های معمولی مانند ذرت، سیب زمینی، برنج، گندم و غیره حاوی ۷۰ تا ۸۰ درصد آمیلوپکتین و ۲۰ تا ۳۰ درصد آمیلوز هستند؛ بنابراین، گرانول نشاسته دارای هر دو ناحیه بی شکل و بلوری است که در دانه چیده شده اند.

تغییرات فیزیکی و شیمیایی مختلف مانند دمای ذوب، ژلاتین شدن، انتقال شیشه ای، تغییر ساختار بلوری، تبلور، انبساط حجمی، تخریب مولکولی و حرکت آب در حین حرارت دادن، رفتار حرارتی نشاسته ها را پیچیده می کند بنابراین، تجزیه و تحلیل رفتار حرارتی نشاسته ها در مواد غذایی بسیار مهم است. رفتار حرارتی به شدت به نسبت آب به نشاسته بستگی دارد. اولین بار توسط شاگرن [۱۲] گزارش شد که ذوب نشاسته ذرت با محتوای آب کمتر، ۱۱ تا ۳۰ درصد در دمای ۱۹۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد رخ داد و هنگامی که محتوای آب بالای ۳۰ درصد بود، منطقه بی شکل در دمای حدود ۷۰ درجه سانتی گراد شروع به ژلاتین شدن کرد. تجزیه و تحلیل درجه انبساط فوم ها پیچیده است زیرا هرگونه افزودنی مورد استفاده (روان کننده یا عامل دمنده) یا روش پردازش می تواند بر انبساط فوم ها تأثیر گذار باشد. تجزیه و تحلیل چگالی فوم روشی برای مقایسه و ارزیابی فوم های باشد. جدول (۱) چگالی فوم را با نشاسته کاساوا و مواد افزودنی مختلف نشان می دهد. فوم حاوی افزودنی کنجاله کنجد بالاترین چگالی را نشان می دهد که ممکن است مربوط به انبساط کمتر کف و یا تعداد سلول کمتری باشد. چگالی متوسط نمونه منبسط شده 0.21 گرم بر سانتی متر مکعب بود.

جدول (۱): چگالی فوم نشاسته کاساوا با افزودنی های مختلف

منابع	افزودنی	چگالی (گرم / سانتی متر مکعب)	نشاسته
[۱۳]	پوست بادام زمینی	0.21 ± 0.01	کاساوا
[۱۴]	پلی وینیلیدین کلراید	0.21 ± 0.02	کاساوا
[۱۵]	کنجاله کنجد	0.30 ± 0.02	کاساوا
[۱۶]	فسفات نشاسته	0.21 ± 0.02	کاساوا
[۱۷]	الیاف طبیعی و کیتوزان	0.14 ± 0.01	کاساوا
[۱۸]	آمیلوز	0.18 ± 0.01	کاساوا

با توجه به محتوای آب و ماریچ های دوگانه آمیلوپکتین نشاسته ممکن است سه نوع بلورینگی اصلی (A, B, C) با شدت خطوط

جرج و همکاران [۳۱] به مطالعه و مقایسه تهیه فوم با استفاده از نشاسته‌های گندم، نخود و سیب‌زمینی به کمک روش اکستروژن پرداختند. نتایج نشان داد که فوم‌های ساخته شده از نشاسته گندم بهترین خواص مکانیکی را نشان دادند استفاده از نشاسته گندم، گلیسرول، گلوتن و بی‌کربنات سدیم بهترین نتیجه را از نظر انبساط پایدار ارائه نمودند.

نشاسته ذرت هیدروکسی پروپیل، پلی‌وینیل‌آمید (عامل تقویت‌کننده)، گلیسرول و آب (نرم‌کننده) و کربنات کلسیم (عامل هسته‌زا) به کمک فرآیند اکستروژن انجام شد. لیو همکاران [۳۲] خواص ویسکوالاستیک، پایداری حرارتی و عملکرد مکانیکی فیلم با افزایش درجه هیدرولیز پلی‌وینیل‌آمید به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشید و این امر به برهمکنش و درهم‌تنیدگی بین مولکول‌های نشاسته و پلی‌وینیل‌آمید نسبت داده می‌شود. علاوه بر این افزودن پلی‌وینیل‌آمید منجر به کاهش قابل‌توجهی در جذب آب شد به‌طور خاص فوم‌های حاوی ۲۰ درصد پلی‌وینیل‌آمید با درجه هیدرولیز ۹۸ درصد کمترین جذب آب، کمترین چگالی ظاهری، بالاترین نسبت کف و بیشترین نسبت تخلخل را نشان دادند.

اثر افزودن فیبر سلولز بر خواص پلی‌لاکتیک اسید و پلی‌بوتیلن سوکسینات مورد بررسی قرار گرفت [۳۳]. نتایج نشان داد که با افزودن فیبر سلولز، گرانیروی کاهش می‌یابد همچنین استحکام کششی، مدول کششی و درصد ازدیاد طول در هنگام شکست با افزودن مقدار فیبر سلولز افزایش یافت. در این مطالعه افزودن فیبر سلولز به مقدار 15 phr^1 باعث بهبود خواص مکانیکی و حرارتی شد. شکل (۱) تصاویر ریزساختار فوم‌های پلی‌لاکتیک اسید/پلی‌بوتیلن سوکسینات را با افزودن مقدار متفاوت فیبر سلولز نشان می‌دهد. ساختار سلولی پلی‌لاکتیک اسید/پلی‌بوتیلن سوکسینات (الف) و پلی‌لاکتیک اسید/پلی‌بوتیلن سوکسینات/فیبر سلولز (ب، ج، د) دیواره سلولی بسته را نشان می‌دهد زیرا تجزیه سدیم بی‌کربنات تولید دی‌اکسید کربن می‌کند که به بسته شدن سلول‌ها روی ساختار فوم زیستی کمک می‌کند. با افزودن فیبر سلولز به تدریج اندازه سلول کوچک‌تر و تعداد سلول‌ها و توزیع سلولی افزایش یافت که این امر به دلیل این بود که فیبر سلولز شاخص جریان مذاب را پلی‌لاکتیک اسید / پلی‌بوتیلن سوکسینات را به‌طور مؤثری افزایش داد.

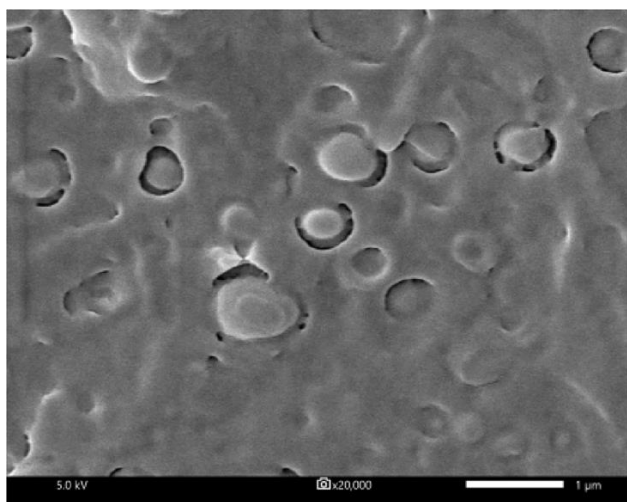
آن پر اکسیدهای کلسیم بارگذاری شده بودند پرداختند. فوم‌ها ساختارهای سلول باز را ارائه نمودند و نسبت بازیابی فشرده‌سازی ۹۴ درصد را نشان دادند پس از پوشش دهی نشاسته با محلول پلی‌وینیل‌الکل که در آن پر اکسیدهای کلسیم بارگذاری شده بودند فوم‌ها رفتار آزادسازی اکسیژن قابل‌کنترل در شرایط مرطوب و همچنین استحکام فشاری بالا (۲/۲ مگا پاسکال) را نشان دادند همچنین این فوم با کاهش حداکثر جذب رطوبت از ۲۵ به ۱۴ درصد مقاومت بهتری را در برابر رطوبت ارائه نمودند. تولید فوم زیست‌تخریب‌پذیر از نشاسته کاساوا گرمانرم (۷۰ درصد)، پلی‌استر (۳۰ درصد) زیست‌تخریب‌پذیر و لاتکس (به‌منظور کاهش جذب رطوبت) با استفاده از روش اکستروژن توسط آلبان - بلنا و همکاران [۲۵] انجام شد. چگالی ظاهری فوم کاهش یافت همچنین آغشته کردن فوم به لاستیک طبیعی یک‌لایه نفوذپذیر ایجاد کرد همچنین مشخص شد که این فوم در کمتر از ۱۸۰ روز ۹۷ درصد کانی‌سازی را ارائه می‌دهد.

امکان استفاده از فوم کامپوزیتی بر پایه نشاسته با استفاده از روش اکستروژن در بسته بندی گوشت مرغ تازه مورد مطالعه قرار گرفت [۲۶]. نیسین به‌عنوان عامل ضد میکروبی به کامپوزیت فوق افزوده شد. نمونه‌های حاوی ترکیبات ضد میکروبی مدول یانگ، استحکام خمشی بالا و اثر ضد میکروبی در برابر میکروارگانیسم‌های غذایی نشان داد. نیسین اکسیداسیون لیپید گوشت مرغ را کاهش داد.

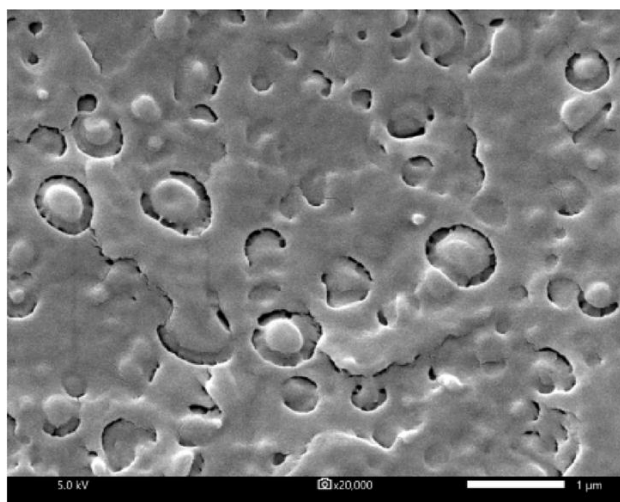
آیس و همکاران [۲۷] به بررسی فوم‌های کامپوزیتی نشاسته و چغندر قند با استفاده از اکستروژن دو مارپیچه پرداختند. نتایج نشان داد که ساختار فوم به طرز مناسبی همگن شده بودند.

کهوند و همکاران [۲۸] فوم‌های نشاسته گرمانرم، پلی‌وینیل‌الکل و نرم‌کننده (گلیسرول و آب) توسط فرآیند اکستروژن مذاب را تهیه نمودند. فوم‌های نشاسته گرمانرم (۷۰ درصد) حاوی پلی‌وینیل‌الکل (۲۰ درصد) و نرم‌کننده مرفولوژی یکنواخت‌تر، چگالی کمتر و تراکم سلولی بالاتر را نسبت به فوم‌های نشاسته گرمانرم ارائه نمودند. تلاشی برای ارزیابی تأثیر الیاف سلولز بر ویژگی‌های فیزیکی فوم کاساوا توسط کایسانگ و همکاران [۲۹] انجام شد. بیشترین انبساط فوم نشاسته کاساوا با ۵ درصد الیاف سلولز در رطوبت ۱۵ درصد با سرعت پیچ ۲۵۰ دور در دقیقه مشاهده شد. در مطالعه فانگ و همکاران [۳۰] به بررسی فوم‌های نشاسته حاوی پلی‌لاکتیک اسید پرداختند. افزودن پلی‌لاکتیک اسید (۴۰ درصد) به نشاسته باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی فوم‌های اکستروژن شده شد.

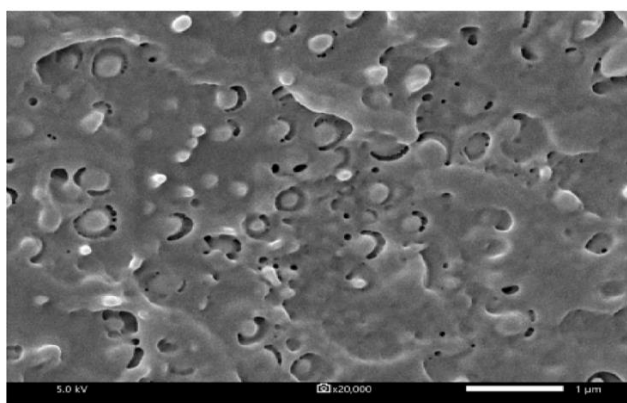
¹ Parts Per Hundred Resin



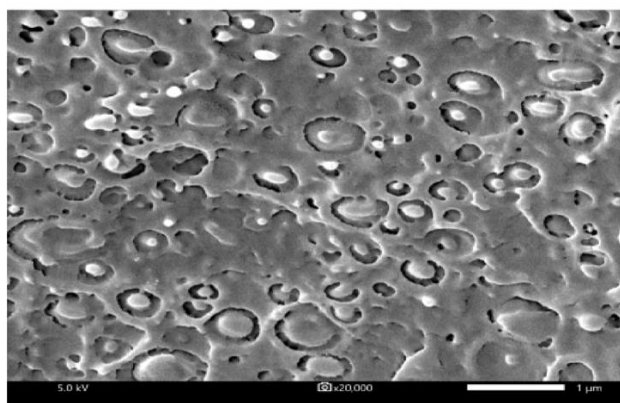
(الف) پلی لاکتیک اسید / پلی بوتیلین سوکسینات



(ب) پلی لاکتیک اسید / پلی بوتیلین سوکسینات / فیبر سلولز (۵ phr)



(ج) پلی لاکتیک اسید / پلی بوتیلین سوکسینات / فیبر سلولز (۱۰ phr)

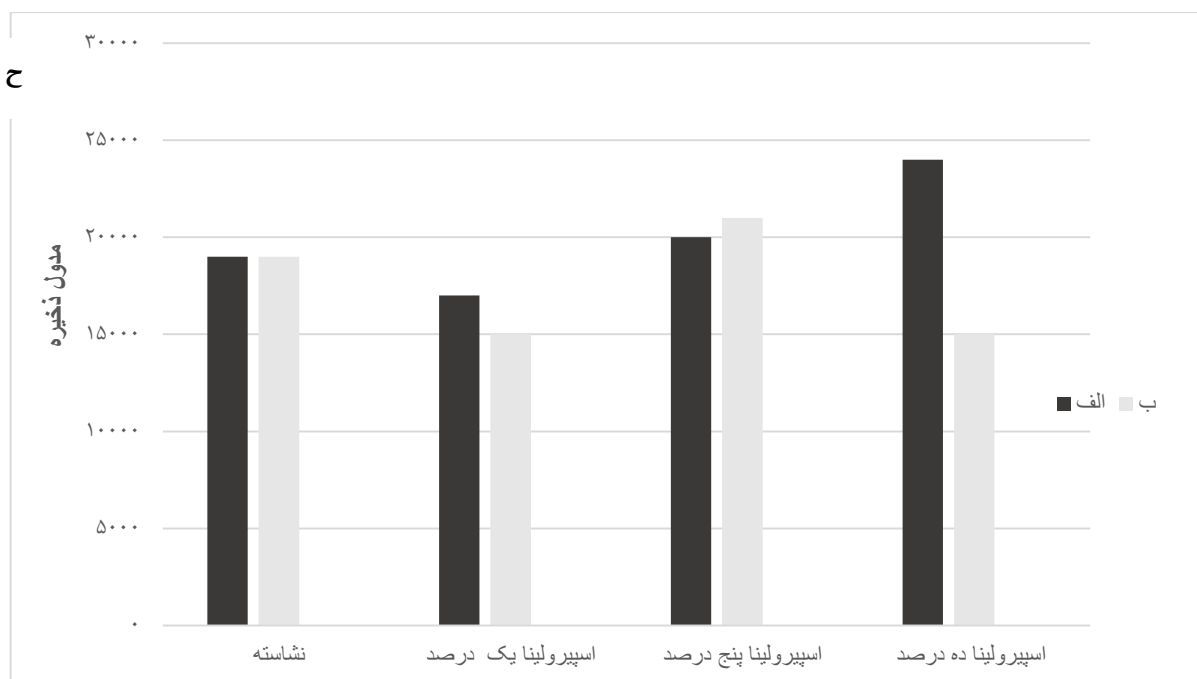
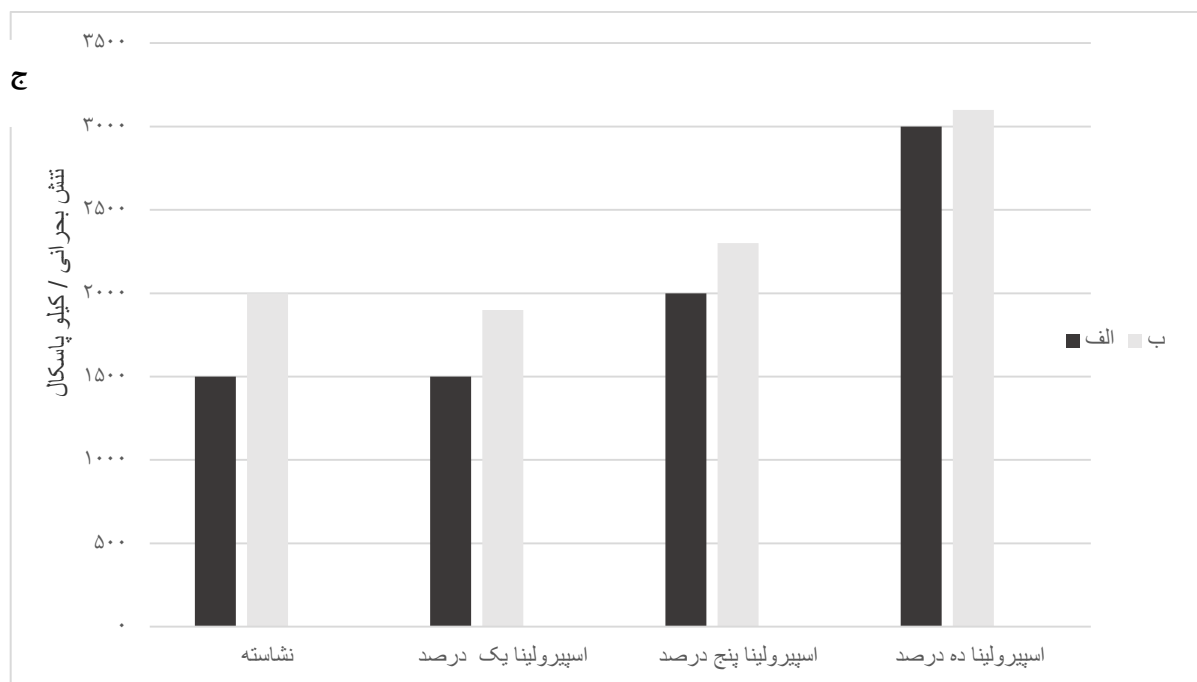


(د) پلی لاکتیک اسید / پلی بوتیلین سوکسینات / فیبر سلولز (۱۵phr)

شکل (۱): تصاویر ریزساختار فوم های پلی لاکتیک اسید / پلی بوتیلین سوکسینات (الف) و پلی لاکتیک اسید / پلی بوتیلین سوکسینات / فیبر سلولز (ب، ج، د) [۳۳]

نمونه های حاوی اسپیرولینا می تواند افزایش سختی فوم را توجیه کند. از سوی دیگر سفتی فوم ها به طور قابل توجهی تحت تأثیر با مدول فشرده سازی آن ها قرار نگرفت (۲۵۰۰ - ۱۵۰۰۰ شکل (۲) (ج)) لازم به ذکر است که هر چه مقادیر انحراف استاندارد برای فوم نشاسته خالص بیشتر باشد ناهمگونی ساختاری بیشتر است. قوی ترین نمونه (ارائه بالاترین تنش بحرانی) با نمونه های با چگالی ظاهری بیشتر و حاوی دیوارهای سلولی نازک تر و تعداد سلول های بیشتر (اسپیرولینا ۱۰ درصد) است در حالی که ساختارهای درشت با تعداد سلول کمتر ضعیف ترین نمونه (نشاسته خالص و اسپیرولینا یک درصد) بود.

مارتینز - سانز و همکاران [۳۴] به بررسی فوم های ریز جلبک اسپیرولینا (۱، ۵ و ۱۰ درصد) و نشاسته اکستروود شده پرداختند. نمونه های به دست آمده در رطوبت نسبی ۳۰ درصد و دمای ۱۴ درجه سانتی گراد به مدت ۲ تا ۳ روز (الف) و یک ماه (ب) متعادل شدند. همان طور که از شکل (۲) (ج) استنباط شد بالاترین بارگذاری منجر به افزایش قابل توجهی تنش بحرانی (۲۹۶۶ ± ۳۲۲ کیلو پاسکال) برای اسپیرولینا ۱۰ درصد در مقایسه با (۱۵۰۵ ± ۵۷۳، ۳۱۰ ± ۱۵۶۸ و ۶۲۲ ± ۲۰۱۱ کیلو پاسکال) به ترتیب برای نشاسته، اسپیرولینا یک درصد و اسپیرولینا ۵ درصد بود. دلیل آن را می توان به اثر پروتئین در محدود کردن دسترسی رطوبت به نشاسته نسبت داد تبلور



شکل (۲): (ج) منحنی‌های تنش بحرانی برای نمونه‌های قبل (الف) و بعد از (ب) ذخیره‌سازی. (ح) میانگین مدول فشرده‌سازی نمونه‌های اکستروژ شده قبل (الف) و بعد از (ب) ذخیره‌سازی [۳۴]

۲-۲-۲- پخت / فشرده‌سازی

دانه‌های نشاسته به یک خمیر غلیظ، باعث می‌شود که خمیر به‌طور چشمگیری منبسط شود. سپس خشک شدن تدریجی فوم نشاسته‌ای اتفاق می‌افتد و در نهایت شکل قالب را به خود می‌گیرد [۳۶]. ساختار فوم پخته‌شده یک‌لایه پوست بیرونی با ساختار کوچک، متراکم و سلول بسته را به تصویر می‌کشد. درحالی‌که

پخت خمیر نشاسته و آب در یک قالب بسته گرم شده برای چند دقیقه منجر به تشکیل فوم‌های مبتنی بر نشاسته با اشکال دلخواه می‌شود [۳۵]. تبخیر آب محصورشده در حین زلاتین شدن

از ماتریکس، سامانه های فوم جامد را تشکیل می دهند [۴۰]، [۴۱].

شوکیست و گاتنهولم [۴۲] پردازش فوم از سه نشاسته مختلف آمیلوپکتین سیب زمینی، سیب زمینی با آمیلوز بالا و سیب زمینی بومی با استفاده از حرارت دادن ماکروویو با فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز به مدت ۳ دقیقه را گزارش کردند و به این نتیجه رسیدند که نشاسته آمیلوپکتین ماده اولیه بهتری برای تهیه فوم نسبت به فوم های نشاسته غنی از آمیلوز است لی و همکاران [۲۴] گرانول های اکستروژن شده قابل انبساط را با اکستروژن گرانول های نشاسته منبسط نشده و به دنبال آن حرارت دادن ماکروویو و بهینه سازی انبساط در حدود ۵۰ درصد ژلاتین شدن تحت اکستروژن نشاسته در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار دادند.

زو و همکاران [۴۳] تهیه بلوک های فوم نشاسته ای را با روش قالب گیری به کمک ماکروویو^۱ (MAM) گزارش کردند پلی تترا فلئورواتیلن^۲ (PTFE) مناسب ترین انتخاب به عنوان ماده قالب برای فرآیند MAM است زیرا دمای بالا، ماهیت نجسب و جذب ناچیز انرژی ماکروویو را دارد. در این فرآیند، انرژی ماکروویو به گرانول های اکستروژن شده در حفره قالب بارگذاری شده برای تشکیل بلوک های فوم نشاسته اعمال شد. اخیراً، لویز و همکاران [۴۴] گزارش سنتز بلوک های فوم از ورقه های نشاسته ترموفوم شده توسط حرارت ماکروویو را گزارش نمودند. داربست های متخلخل مبتنی بر نشاسته برای مقاصد مهندسی بافت را می توان با گرمایش ماکروویو تهیه کرد. سینگ و همکاران [۴۵] فوم های پلی لاکتیک اسید و نانو هیدروکسی آپاتیت با کمک روش ماکروویو انجام دادند میزان تخلخل ۲۵-۲۳ درصد مشاهده شد حداکثر درصد بلورینگی در ۱۵ درصد نانو هیدروکسی آپاتیت و حداکثر مقاومت خمشی در ۱۰ درصد نانو هیدروکسی آپاتیت مشاهده شد.

۲-۲-۴- فرآیند خشک کردن انجمادی

در سال ۱۹۰۶ برداز و آرسنوال روش خشک کردن انجمادی را در مقیاس آزمایشگاهی معرفی کردند که در آن یک محصول منجمد با استفاده از خلأ خشک می شود. در حال حاضر، روش خشک کردن انجمادی به طور مؤثر در طیف گسترده ای از کاربردها

لایه داخلی یک ساختار سلولی بزرگ و باز را نشان می دهد. هندسه قالب، ترکیب خمیر، حجم خمیر، دمای پخت و زمان پخت عوامل اصلی تعیین کننده شکل، ضخامت و چگالی کف هستند. زمان و دمای بهینه پخت معمولاً به ترتیب در محدوده ۳۰۰-۱۲۵ ثانیه و ۲۵۰-۱۸۰ درجه سانتی گراد است.

استنارات منیزیم و صمغ گوار به ترتیب برای آزادسازی قالب و جلوگیری از ته نشین شدن نشاسته به خمیر اضافه می شوند [۲۳]. نوع نشاسته تعیین کننده چگالی کف نشاسته پخته است. گلین و همکاران [۳۵] گزارش کردند که سامانه های فوم پخته ساخته شده از نشاسته سیب زمینی و تاپیوکا، چگالی کمتری (۰/۱۲ گرم بر سانتی متر مکعب) نسبت به سامانه های ساخته شده از گندم و ذرت (۰/۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب) دارند. افزایش گرانیوی باعث تضعیف انبساط کف می شود و در نتیجه گرانیوی خمیر بر کیفیت محصول تأثیر می گذارد. به طور کلی خمیرهایی با محتوای نشاسته بالاتر، گرانیوی بالاتری دارند [۳۷]. بیرج و همکاران [۳۸] ادغام الیاف پنبه و میکرو فیبر پنبه به فوم های نشاسته (حاوی پلی وینیل الکل و آب) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که هر دو نوع پنبه سازگاری و همگنی عالی با نشاسته داشتند و به طور قابل توجهی خواص مکانیکی فوم ها را بهبود بخشیدند فوم های با مقدار بیشتری از الیاف پنبه (۲ و ۳/۳ درصد) بهترین نتیجه را برای آزمون های ضربه و کششی نشان دادند.

فوم های حاوی نشاسته به عنوان منابع تجدید پذیر به تنهایی کف ضعیفی را ایجاد می کنند. افزودن کوکو پیت به عنوان تقویت کننده الیاف و پلی وینیل آمید برای بهبود خواص کف با استفاده از فرآیند پخت توسط اسکنتری و همکاران [۳۹] به نشاسته انجام شد. افزودن کوکوپیت باعث افزایش ضخامت فوم شد و چگالی آن را کاهش داد. مخلوط فوق فوم هایی با مدول الاستیسیته بالا ایجاد نمود فوم های زیستی خواص مکانیکی خوبی داشتند.

۲-۲-۳- گرمایش ماکروویو

از انرژی ماکروویو می توان برای پخت و گسترش برخی از غذاهای غلات مانند ذرت بوداده استفاده کرد. هنگامی که در ماکروویو ماده بالاتر از نقطه جوش آب گرم می شود، آب به بخار تبدیل می شود و فشار زیادی در داخل ایجاد می کند. دانه های نشاسته شروع به ژلاتین شدن می کنند، با فشار حباب های بخار به یک ساختار سلولی منبسط می شوند و در نهایت با از بین رفتن رطوبت

^۱Microwave-Assisted Molding

^۲Polytetrafluoroethylene

خوبی را نشان داد اما دوام آن‌ها در هنگام قرارگیری در یک محیط مرطوب پایین بود.

۲-۲-۵- سیال فوق بحرانی^۱ (SCF)

در فرآیند فوم سازی فیزیکی اکستروژنی با استفاده از گاز فوق بحرانی به عنوان عامل فوم زاء، گاز تزریق شده به داخل سیلندر اکسترودر تحت فشار در داخل مذاب پلیمر حل می‌شود بعد از خروج از اکسترودر و افت فشار وارده بر مذاب، مولکول‌های گاز انحلال یافته در مذاب جدایی فاز داده و طی این فرآیند حباب‌های فوم را هسته گذاری نموده و رشد می‌دهند. [۴۹] فوم‌های میکرو سلولی مبتنی بر نشاسته با محدوده اندازه سلولی ۲۰۰-۵۰ میکرومتر با موفقیت توسط سیال فوق بحرانی تهیه شد. به گفته آلوی و همکاران [۵۰] پارامترهای مختلف فرآیند و مواد، مانند دمای نازل، تنش تسلیم مذاب و گرانیروی مذاب، سرعت تزریق دی‌اکسید کربن، دمای کوره پس از اکستروژن و غیره، به طور قابل توجهی بر اندازه حباب نهایی و نسبت انبساط اکسترودر نشاسته تأثیر می‌گذارند. در میان سایر موارد، سیال فوق بحرانی به عنوان قابل کنترل ترین و پرکاربردترین فرآیند برای تهیه فوم‌های مبتنی بر نشاسته با اندازه سلولی مطلوب، تراکم سلولی، گسترش محصول در نظر گرفته می‌شود، زیرا می‌توان به راحتی پارامترهای پردازش را دست کاری کرد.

چانگ و همکاران [۳۴] به مطالعه فوم‌های نشاسته گرمانرم و پلی بوتیلن آدیپیت کو ترفتالات و سازگار کننده سیلان با استفاده از گاز کف کننده دی‌اکسید کربن فوق بحرانی پرداختند فرآیند تشکیل فوم در دو دمای ۸۵ و ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و در دو فشار مختلف ۱۷ و ۲۳ مگا پاسکال بهینه شد. نتایج به دست آمده نشان داد که اصلاح سطح توسط سیلان می‌تواند سازگاری کامپوزیت فوق را بهبود بخشد چگالی فوم ۱۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد در حالی که نشاسته گرمانرم و پلی بوتیلن آدیپیت کو ترفتالات بدون سازگار کننده چگالی فوم بالا ۰/۳۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب نشان داد و فوم‌های سخت و سفت با خواص کششی ضعیف را ارائه نمودند. در این مطالعه مشخص شد که فوم حاوی ۲۰ درصد نشاسته گرمانرم و ۸۰ درصد پلی بوتیلن آدیپیت کو ترفتالات می‌تواند خواص انعطاف پذیری مناسبی را داشته باشد.

در زمینه‌های مختلف مانند صنایع غذایی، زمینه‌های زیست پزشکی و دارویی، تحقیقات و غیره استفاده می‌شود [۴۶] روش خشک کردن انجمادی مورد استفاده برای تولید فوم‌های زیست تخریب پذیر عمدتاً شامل سه مرحله است: انجماد، خشک کردن اولیه و خشک کردن ثانویه [۴۷].

اولین مرحله از فرآیند خشک کردن انجمادی، انجماد است، جایی که نمونه‌های مایع تا دمای کافی پایین خنک می‌شوند تا تبدیل به جامد شوند. با کاهش دما، املاح از آب جدا می‌شود و در نواحی میان بافتی بین بلورهای یخ به دام می‌افتد. در اینجا اندازه بلورهای یخ تا حد امکان کوچک نگه داشته می‌شود تا آسیب فیزیکی به نمونه‌ها کاهش یابد. تشکیل بلورهای یخ شامل دو مرحله است، یکی هسته زایی و دیگری رشد بلوره‌ها. انجماد سریع و سرعت هسته زایی بالاتر منجر به تشکیل بلوره‌های یخ همگن و کوچک تر می‌شود مرحله خشک کردن انجمادی به مرحله بعدی ادامه می‌یابد، خشک کردن اولیه که در آن بلوره‌های یخ توسط فشار و دمای پایین تصعید می‌شوند و در نتیجه شبکه باز از منافذ را تشکیل می‌دهند [۴۶]. بخار تصعید شده از طریق لابه‌های متخلخل از طریق همرفت یا انتشار حذف می‌شود در این مرحله، فشار نقش حیاتی ایفا می‌کند، زیرا به عنوان نیروی محرکه برای حرکت بخار آب عمل می‌کند؛ بنابراین، فشار کمتر محفظه منجر به تصعید سریع تر یخ می‌شود. مرحله نهایی خشک کردن انجمادی، خشک کردن ثانویه است که در آن آب باقیمانده از فاز اصلاح از طریق دفع حذف می‌شود حتی پس از فرآیند خشک کردن اولیه، ۵ تا ۲۰ درصد از آب باقیمانده در محصول متخلخل باقی می‌ماند. خشک کردن ثانویه برای به حداقل رساندن رطوبت باقیمانده مواد متخلخل به سطح بهینه (کمتر از ۱٪) انجام می‌شود [۴۷].

گلین و همکاران [۳۵] فوم‌های میکرو سلولی بر پایه نشاسته یخ زده را با استفاده از آکواژل‌های گندم، ذرت، تاپیوکا و نشاسته سیب زمینی تولید کردند. صفحات آکواژل پس از خارج کردن از قالب، یک شب در یخزن در دمای منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. پس از کاهش فشار محفظه یخ خشک کن به 1.33×10^{-5} مگا پاسکال رسید آکواژل های قرار داده شده در داخل سینی‌های حرارتی به مدت ۳ روز تا دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند تا فوم‌هایی با دیواره سلولی نازک و پیوسته با استحکام کششی نسبتاً بالاتری به دست آید.

مطالعه متیاس و همکاران [۴۸] بر توسعه فوم زیستی بر پایه کیتوزان تمرکز داشت. اگرچه فوم زیستی کیتوزان خواص عایقی

^۱Super Critical Fluid

ترکیب ساخته شده از ۸۰ درصد پلی لاکتیک اسید و ۲۰ درصد نشاسته گرمانرم کف یکنواختی را ایجاد نمود. جدول (۲) روش های مختلف تهیه فوم های زیستی (دی اکسید کربن فوق بحرانی، اکستروژن، پخت، ماکروویو و انجمادی) را با استفاده از ترکیبات زیست تخریب پذیر نشان می دهد.

در مطالعه چاوتی و همکاران [۵۱] مخلوط های ساخته شده از نشاسته گرمانرم و پلی لاکتیک اسید با استفاده از فن اکستروژن و سیال فوق بحرانی دی اکسید کربن مورد مطالعه قرار گرفت. به دلیل ناسازگاری بین دو ترکیب پلی لاکتیک اسید ۵۰ درصد و نشاسته گرمانرم ۵۰ درصد کف ضعیفی ایجاد شد با این حال

جدول (۲): روش های تهیه فوم های زیستی با استفاده از ترکیبات زیست تخریب پذیر

منابع	نتایج	ترکیبات کامپوزیت	روش تهیه فوم
[۵۲]	بهبود سازگاری کامپوزیت/ چگالی فوم: ۰/۱۶ گرم بر سانتی متر مکعب/ بهبود خواص انعطاف پذیری فوم حاوی ۲۰ درصد نشاسته گرمانرم و ۸۰ درصد پلی بوتیلن آدیپت کو ترفتالات	نشاسته گرمانرم/ پلی بوتیلن آدیپت کو ترفتالات/ سیلان (سازگار کننده)	مخلوط و پرس داغ/ دی اکسید کربن فوق بحرانی (عامل دمنده یا کف ساز)
[۵۱]	ایجاد کف یکنواخت	نشاسته گرمانرم (۲۰ درصد) / پلی لاکتیک اسید (۸۰ درصد)	اکستروژن/ سیال فوق بحرانی دی اکسید کربن
[۳۸]	الیاف ۲ و ۳/۳ درصد الیاف پنبه: بهبود خواص مکانیکی، آزمون ضربه خواص کششی	نشاسته/ پلی وینیل الکل/ الیاف پنبه	پخت (قالب گرم ۱۸۰ درجه سانتی گراد) و پرس هیدرولیک ۲/۵ تن به مدت ۲۴۰ ثانیه
[۳۹]	افزایش ضخامت فوم/ کاهش چگالی/ بهبود خواص مکانیکی و قابلیت جذب آب بالا	استئارات منیزیم/ آب / نشاسته/ پلی وینیل آمید/ کوکو پیت	پخت
[۴۵]	میزان تخلخل: ۲۵-۲۳ درصد/ ساختار منافذ بهم پیوسته و همگن/ حداکثر درصد بلورینگی (۱۵ درصد نانو هیدرو کسی آپاتیت)/ حداکثر مقاومت خمشی (۱۰ درصد نانو)	پلی لاکتیک اسید/ نانو هیدرو کسی آپاتیت (۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی)	ماکروویو
[۴۸]	ایجاد خواص عایقی در محیط مرطوب	کیتوزان	انجمادی
[۲۴]	آزادسازی اکسیژن قابل کنترل در شرایط مرطوب/ استحکام فشاری بالا (۲/۲ مگا پاسکال)/ مقاومت بالاتر در برابر رطوبت	نشاسته پوشش دهی با پلی وینیل آمید، بارگذاری شده با پر اکسیدهای کلسیم	اکستروژن و پوشش دهی
[۲۵]	انعطاف پذیری بالا/ چگالی ظاهری پایین/ کاهش جذب رطوبت	نشاسته کاساوا (۷۰ درصد) / پلی استر زیست تخریب پذیر/ گلوتن گندم/ لاتکس طبیعی	اکستروژن
[۲۶]	مدول یانگ و استحکام کششی بالا / جذب آب پایین و اثر ضد میکروبی	نشاسته/ نیسین (عامل ضد میکروبی)	اکستروژن
[۲۷]	اختلاط مناسب و ایجاد فاز همگن	نشاسته/ چغندر قند	اکستروژن

جدول (۲): روش‌های تهیه فوم‌های زیستی با استفاده از ترکیبات زیست تخریب پذیر

منابع	نتایج	ترکیبات کامپوزیت	روش تهیه فوم
[۲۸]	بهبود قابل توجهی در انبساط/ کاهش چگالی/ جذب رطوبت	نشاسته گرمانرم/ پلی وینیل الکل/ گلیسرول و آب (نرم کننده)	اکستروژن مذاب
[۲۹]	افزایش نسبت انبساط نسبت به نمونه شاهد	الیاف سلولز (۵ درصد) /نشاسته کاساوا	اکستروژن
[۳۰]	بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی	نشاسته گرمانرم/ پلی لاکتیک اسید (۴۰ درصد)	اکستروژن
[۳۱]	بهبود خواص مکانیکی/ بهبود انبساط پایدارتر فوم	نشاسته گندم/ گلوتن/ بی کربنات سدیم/ گلیسرول	اکستروژن
[۳۲]	بهبود خواص ویسکوالاستیک، پایداری حرارتی و عملکرد مکانیکی فوم/ کاهش جذب آب/ بالاترین نسبت کف و بیشترین تخلخل	نشاسته ذرت هیدرو کسی پروپیل/ پلی وینیل آمید (۲۰ درصد، با درجه هیدرولیز ۹۸ درصد)/ گلیسرول (نرم کننده) / کربنات کلسیم (عامل هسته زا)	اکستروژن
[۳۳]	کاهش گرانروی/ افزایش استحکام کششی، مدول کششی و درصد ازدیاد طول در هنگام شکست/ بهبود خواص مکانیکی و حرارتی	سدیم بی کربنات/ فیبر سلولز/ پلی لاکتیک اسید	اکستروژن

۳- اصلاح فوم‌های مبتنی بر نشاسته

روش‌های عملی برای غلبه بر محدودیت‌ها و بهبود عملکرد فوم‌های مبتنی بر نشاسته در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت. فوم‌های مبتنی بر نشاسته خالص دارای خواص عملکردی رضایت‌بخشی نیستند که عمدتاً به ماهیت آبدوستی و شکنندگی آن‌ها نسبت داده می‌شود. به منظور بهبود مقاومت به رطوبت نشاسته، گروه‌های هیدروکسیل آبدوست آن با استفاده از ترکیبات آب‌گریز اصلاح می‌شوند [۵۴]. چندین محقق بر روی تولید فوم با استفاده از نشاسته‌های اصلاح‌شده شیمیایی مانند نشاسته‌های هیدرو کسی پرو پیل شده و استیله تمرکز کرده‌اند. گوان و همکاران [۵۵] به بررسی نشاسته استیله سیب‌زمینی و ذرت طبیعی (۲۵ درصد آمیلوز) و نشاسته ذرت آمیلوز بالا (۷۰ درصد)، پلی لاکتیک اسید (۷/۵، ۱۵ و ۱۳ درصد) و اتانول (۸، ۱۳ و ۱۸ درصد) با استفاده از روش اکستروژن در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه پرداختند. درجات جایگزینی نشاسته سیب‌زمینی استیله، نشاسته ذرت طبیعی و نشاسته ذرت آمیلوز بالا به ترتیب ۱/۰۹، ۲/۰۵ و ۲/۶۵ بود. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین سختی مربوط به ذرت آمیلوز

نشاسته از نسبت‌های مختلف آمیلوز (خطی) و آمیلوپکتین (شاخه‌ای) تشکیل شده است. مطالعات متعددی در مورد ساخت فوم‌های بر پایه نشاسته توسط فرآیندهای مختلف انجام شده است اما یکی از معایب عمده فوم‌های نشاسته‌ای عدم مقاومت در برابر رطوبت و خواص مکانیکی ضعیف آن‌ها است. ماهیت هیگروسکوپیک آن عمدتاً به دلیل واحد گلوکوپیرانوزیل (تکرارشونده) نشاسته با گروه‌های هیدروکسیل آزاد متعدد است که می‌تواند به راحتی با رطوبت پیوند هیدروژنی تشکیل دهد. معمولاً دانه‌های نشاسته در آب سرد نامحلول هستند زیرا زنجیره‌های نشاسته توسط یک پیوند هیدروژنی قوی به هم متصل می‌شوند [۵۳]. علاوه بر این، فوم‌های نشاسته‌ای دارای ناپایداری ابعادی هستند یا می‌توانند در حضور آب یا رطوبت فروپریزند که استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند. تحقیقات گسترده‌ای برای بهبود بیشتر خواص مکانیکی موجود و مقاومت در برابر آب فوم‌های نشاسته متخلخل انجام شده است [۵۴].

ساختاری و فشاری سینی های CSF افزایش یافت. CSF حاوی ۱۵ درصد زئین، جذب آب و شاخص حلالیت در آب پایین را نشان داد. CSF مخلوط شده با الیاف کرافت ۱۵٪ بالاترین مقاومت فشاری را نشان داد زیرا یک تعامل سطحی خوبی بین فیبر و ماتریس نشاسته وجود دارد که به ماتریس کمک می کند تا تنش را به طور موثر به فیبر تقویت کننده منتقل کند.

۳-۲- فوم کامپوزیت نشاسته / الیاف طبیعی

ادغام الیاف طبیعی مختلف به سیستم بیوکامپوزیت مبتنی بر نشاسته به بهبود رضایت بخشی در خواص مکانیکی فومها کمک می کند. قابلیت انتقال تنش بهتر در سیستم کامپوزیت را می توان به شیمی مشابه نشاسته و الیاف طبیعی نسبت داد که منجر به سازگاری خوب و تعامل قوی بین آنها می شود [۴۷].

سویکابکا و همکاران [۳۶] فوم های کامپوزیتی مبتنی بر نشاسته (CSF)^۲ را با ترکیب الیاف کتان یا جوت در خمیر مبتنی بر نشاسته با روش پخت در داخل قالب داغ تهیه کردند. آنها همچنین تأثیر رطوبت، نوع فیبر، محتوای فیبر و نسبت ابعاد فیبر را بر روی خواص مکانیکی CSF مورد مطالعه قرار دادند. CSF تقویت شده با جوت استحکام خمشی بیشتری نسبت به CSF های تقویت شده با کتان نشان داد زیرا الیاف جوت دارای سطح ویژه و سفتی بالاتری نسبت به الیاف کتان است.

افزودن سلولز و سلولز میکروفیبریل شده افزایش عمده ای در مقاومت در برابر آب در مقایسه با الیاف سلولز گیاهی نشان دادند کامپوزیت های تشکیل شده با سلولز باکتریایی خواص مکانیکی بهبود یافته ای را نشان دادند. سیلوا و همکاران [۶۰] سینی های فوم کامپوزیتی را با پخت نشاسته کاساوا با سلولز باکتریایی تقویت شده با دو روش مختلف تولید کردند. در روش اول، در طی فرآیند پخت، پودر سلولز باکتریایی مستقیماً به ماتریکس نشاسته وارد شد، در حالی که در روش دوم، پس از تولید، سطح سینی با لایه های سلولز باکتریایی پوشانده شد. توانایی کف کردن نشاسته با افزودن سلولز باکتریایی با استفاده از روش اول با تولید سینی هایی با چگالی کم، ضخیم تر و منبسط شده با ظرفیت جذب آب کم افزایش یافت. روش دوم فوم های کامپوزیتی با ازدیاد طول بیشتر ظرفیت جذب آب کمتر تولید شد. لاتون و همکاران [۶۱]

بالا (۷۰ درصد) و کمترین سختی را نشاسته استیل شده سیب زمینی داشت. نشاسته ذرت با درجه جایگزینی بالا (۲/۶۵) تراکم پذیری، چگالی ظاهری کمتر نسبت به سایر نمونه ها ایجاد نمود. انبساط فوم با افزودن پلی لاکتیک اسید افزایش یافت.

مانوی و همکاران [۵۶] اتصال عرضی مخلوط های نشاسته را با فسفوریلایسیون با استفاده از روش اکستروژن سیال فوق بحرانی بررسی نمودند. آنها دریافتند که اتصال دهنده های عرضی می توانند ثبات ابعادی فوم های مبتنی بر نشاسته را همراه با افزایش مقاومت در برابر آب بهبود بخشند. حلالیت در آب کاهش یافت زیرا اتصال عرضی فسفات به نشاسته تحرک ساختار مولکولی را محدود کرد و منجر به افزایش دمای ژلاتین شده شد و در نهایت یک ساختار سفت و سخت به وجود آمد.

۳-۱- فوم های مخلوط نشاسته- پلیمر

یکی از رویکردهای ممکن برای بهبود خواص مکانیکی، ترکیب نشاسته با پلیمرهای زیست تخریب پذیر است افزودن پلیمرهای زیست تخریب پذیر مختلف به نشاسته می تواند باعث بهبود خواص ممانعتی و مکانیکی، فرآیند پذیری، افزایش زیست تخریب پذیری آن و کاهش ماهیت آب دوستی نشاسته شود [۵۷]. شی و همکاران [۵۸] گزارش دادند که لاتکس لاستیک طبیعی در خمیر فوم های نشاسته پخته گنجانده شده است که مقاومت در برابر آب و انعطاف پذیری فوم های حاصل را افزایش می دهد فوم های نشاسته / لاتکس و کاساوا / کیتوزان تولید شده با اختلاط نشاسته با پلیمرهای آب گریز افزایش رضایت بخشی را در مقاومت در برابر آب فوم های مخلوط نشاسته نشان دادند .

کایسانگری و همکاران [۵۹] سینی های فوم نشاسته کاساوا (CSF)^۱ را که با عوامل افزودنی پلیمرهای طبیعی مانند پروتئین سویا، زئین، گلوتن و روغن نخل و کرافت (کاغذ کرافت یا کرافت نوعی کاغذ یا مقوا (کارتن) است که طی فرآیند خمیر سلولز با مواد شیمیایی خاص مانند سولفات ها تولید می شود و استحکام کاغذ را افزایش می دهد) بود، توسعه دادند و بررسی کردند که چگونه خواص پلیمرهای زیستی بر خواص مختلف CSF تأثیر می گذارد. با افزایش غلظت گلوتن و زئین به CSF، مقاومت

² Starch Based Composite Foam

¹ Cassava Starch Foam

۴- فوم‌های زیست تخریب پذیر بر پایه سلولز

فراوان ترین پلیمر زیستی طبیعی موجود در طبیعت سلولز است و از گیاهان، جلبک‌ها، باکتری‌ها و غیره به دست می‌آید. سلولز را می‌توان از ضایعات مقوا، کاغذ و غیره نیز به دست آورد [۶۴] سلولز یک پلیمر محکم با جرم مولی بالا است که ماهیتی فیبری و نیمه بلوری دارد. سلولز یک ماده خام تجدید پذیر، پایدار و ارزان است که زیست تخریب پذیر است بنابراین، می‌تواند به‌طور کامل در محیط زیست تجزیه شود. از آنجایی که سلولز دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به پلیمرهای مصنوعی مانند پلی لاکتیک اسید، پلی وینیل الکل و غیره است، به یک جاذبه تحقیقاتی کلیدی در میان دانشمندان تبدیل شده است. سلولز یک ماده طبیعی و دوستدار محیط زیست است در حالی که پلیمرهای مصنوعی برای محیط زیست مضر هستند. همچنین دارای خواص مکانیکی و حرارتی عالی است [۶۵] نیاز به دانش بیشتری در مورد مواد سلولزی وجود دارد، به‌عنوان مثال، در مورد ساختار آن و تغییراتی که می‌تواند متحمل شود یا واکنش پذیری مواد، برای تنظیم خواص آن به روش‌های مختلف؛ بنابراین، می‌توان از سلولز برای اهداف مختلف استفاده کرد زیرا بهترین گزینه برای تهیه مواد با خواص چندمنظوره است.

مواد سلولزی در مقیاس نانو معمولاً برای بسیاری از کاربردها استفاده می‌شود، زیرا زمانی که آن‌ها در پلیمرهای زیستی گنجانده می‌شوند، خواص مکانیکی و حرارتی آن را تقویت می‌کنند. نانو ساختارهای سلولزی به دو نوع سلولز میکرو فیبریله شده (نانو الیاف سلولزی) و نانوبلورهای سلولزی طبقه بندی می‌شوند. آن‌ها در روش‌های فرآیند و ابعاد متفاوت هستند. هر دو این نانو ساختارها آب دوست هستند بنابراین، ورود آن‌ها به پلیمرهای مبتنی بر نفت آب گریز دشوار می‌باشد. برای غلبه بر این امر، اصلاح نانو ساختار سلولز مورد نیاز است [۶۶].

فوم‌ها دارای نقطه ذوب، گرانشوری و سرعت تبلور پایینی هستند که برای کف کردن پلیمر ضروری است؛ بنابراین، رشد سلول در حین کف کردن منجر به ادغام و پارگی سلول می‌شود. برای غلبه بر این امر و برای به دست آوردن نرخ کریستالیزاسیون بالا که می‌تواند بر استحکام و گرانشوری مذاب کم غلبه کند، می‌توان از اتصال مواد نانو پرکننده مانند نانو ساختار سلولز به

الیاف صنوبر را به‌عنوان یک پرکننده و تقویت کننده در فوم نشاسته ذرت پخته برای افزایش خواص مکانیکی اضافه کردند. استحکام سینی‌های فوم کامپوزیت الیاف نشاسته با افزایش محتوای فیبر (۱۵ درصد) افزایش یافت؛ اما در محتوای فیبر ۳۵ درصد، استحکام به تدریج کاهش یافت.

۳-۳- فوم‌های نانو کامپوزیتی مبتنی بر نشاسته

فوم‌های زیست تخریب پذیر، تقویت کننده و پرکننده‌های نانومقیاس به ماتریس نشاسته برای تولید فوم‌های نانو کامپوزیتی برای بهبود خواص عملکردی است. به‌منظور غلبه بر اشکال فوم‌های معمولی مبتنی بر نشاسته یا پلیمرهای زیستی، کاربرد نانوتکنولوژی به‌طور متمر ثمر برای به حداقل رساندن محدودیت‌های آن‌ها برای ساخت فوم‌های نانو کامپوزیتی با کاربردهای چندوجهی پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته است. به طرق مختلف، نانو پرکننده‌ها را می‌توان در فوم‌ها، مانند نانو لایه‌ها، نانو ذرات کروی یا چندوجهی و نانولوله‌ها ارائه کرد. برخی از کارهای تحقیقاتی اخیر که بر اساس تقویت کننده‌های نانو یا پرکننده‌های نانو انجام شده است، نانو سلولزها، سیلیکات‌های لایه‌ای (رس) و هیدرو کسی آپاتیت برای تولید فوم‌های نانو کامپوزیتی استفاده شده است [۴۷].

لی و همکاران [۶۲] فوم‌های نانو کامپوزیتی را با نشاسته تاپپوکا، پلی (لاکتیک اسید) و کلوزیت NA+ با محتویات خاک رس مختلف به روش مذاب تهیه کردند و تأثیر محتوای نانو رس را بر خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی فوم مورد مطالعه قرار دادند. فوم‌های نانو کامپوزیت، سلول‌های فشرده تری را با افزایش محتوای رس نشان می‌دهند و تراکم سلولی را افزایش می‌دهند کو و همکاران [۶۳] فوم‌های نانو کامپوزیت مبتنی بر پلی لاکتیک اسید^۱ (PLA) را با استفاده از نانوبلورهای سلولز^۲ (CNC) برای تنظیم خواص کششی حلقوی فوم‌های نانو کامپوزیت از طریق فرآیند فوم سازی با فشار بالا ایجاد کردند. در فوم‌های نانو کامپوزیتی مبتنی بر PLA/CNC، کاهش ضخامت دیواره و بهبود تراکم سلولی مشاهده شد.

^۱Poly Lactic Acid

^۲Cellulose Nanocrystals

ترفتالات آدیپیت کو ترفتالات [۵۴]، پروتئین سویا/ نانو ذرات روی [۸۷]، ژلاتین/ نانو ذرات روی [۸۸]، اثر عطرمایه آویشن شیرازی بر روی نشاسته کاساوا و تهیه فیلم فعال [۸۹]، [۹۰]، پلی لاکتاید/ فوم نانو کامپوزیت سیلیکا [۹۱]، فوم پلی کاپرولاکتون با تزریق گاز دی اکسید کربن فوق بحرانی [۹۲]، سینی های زیست تخریب پذیر بر پایه نشاسته کاساوا آمیخته با فیبر طبیعی و کیتوزان [۹۷]، فوم های بسته بندی بر پایه محصولات جانبی گوجه فرنگی [۹۳]، پلی بوتیلن آدیپیت کو ترفتالات/ پوسته برنج [۹۴]، سینی های زیست تخریب پذیر کربنات کلسیم و میکرو جلبک [۹۵]، فوم نشاسته/ پوسته تخم مرغ و پوست میگو [۹۶]، نانولوله های کربنی/ پلی یورتان/ نانو فیبریل کربن [۹۷]، نشاسته ساگو/ لیگنین/ روغن پالم [۹۸]، فوم نشاسته گرمانرم/ کربنات کلسیم [۹۹] انجام شده است.

۴-۱- فرآوری فوم بیوپلیمری نانو ساختار سلولزی

برای تهیه فوم های سلولزی بسته به خواص مورد نیاز فوم به روش های فرآوری متفاوتی نیاز است. برای این منظور از روش های تقویت کننده مختلفی مانند تهیه کامپوزیت، گنجاندن پلیمر و اتصال عرضی و غیره با حفظ تخلخل مواد در سطح بالا استفاده می شود.

عمدتاً سه نوع روش فرآوری دسته ای، فوم اکستروژن و فوم تزریقی مورد استفاده قرار می گیرد. روش هایی مانند پخت در ماکروویو و خشک کردن انجمادی نیز برای کف کردن استفاده می شود [۱۰۰].

فرآوری دسته ای می تواند دو نوع باشد: روش خاموش کردن فشار و روش القای دما. هر دو فرآیند شامل مراحل یکسانی هستند، تفاوت در این است که در حالت اول، هسته سلولی و رشد سلول در خود اتوکلاو در نتیجه افت فشار رخ می دهد، در حالی که در مورد دوم زمانی رخ می دهد که پلیمر اشباع خارج شود و در حمام روغن داغ / حلال قرار می گیرد. دلاهو و همکاران [۱۰۱] نانو الیاف سلولزی / فوم های پلی لاکتیک اسید را با روش کوئینچ فشار در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد تهیه کردند. آن ها فشار کف را از ۱۲ تا ۲۰ مگا پاسکال تغییر دادند و هسته زایی با کاهش سریع فشار به فشار اتمسفر انجام شد؛ بنابراین، نانو الیاف سلولزی باعث افزایش هسته زایی می شود، اما سرعت رشد سلول

پلیمر زیستی مانند پلی لاکتیک اسید برای ایجاد فوم های پلیمری مبتنی بر سلولز استفاده نمود. سلولز به عنوان یک عامل هسته زا عمل می کند که تعداد مکان های هسته زایی و بلوره های بودن مواد را افزایش می دهد که به نوبه خود می تواند ریزساختار کف و خواص حرارتی و مکانیکی را کنترل کند؛ بنابراین، نانو ساختارهای سلولزی می توانند خواص کف پلیمر را بهبود بخشیده و تقویت کنند؛ بنابراین، مواد زیست تخریب پذیر مانند سلولز می توانند به راحتی برای بهبود ویژگی های پلیمری مورد استفاده قرار گیرند که می تواند برای کاربردهای مختلف مانند بسته بندی سبز، ساخت پلیمر سبک، مهندسی بافت، به عنوان عوامل جداسازی، حسگرها، در بخش تحویل، برای تصفیه سوخت زیستی، ابر خازن ها و غیره استفاده شود؛ زیرا خواص جذابی مانند تجزیه پذیری زیستی بالا و زیست سازگاری با برخی ساختارها را نشان می دهند [۶۷]. آن ها همچنین خواص رئولوژیکی و دینامیکی بهبود یافته ای را نشان می دهند که نشان دهنده تأثیر نانو ساختارهای سلولزی در بهبود فرآیند کف سازی است؛ بنابراین، فوم های مبتنی بر سلولز به عنوان یک جایگزین عالی برای فوم های مشتق شده از نفت ظاهر شده اند.

همچنین مطالعات دیگری در زمینه های کامپوزیت فوم نشاسته [۴۷]، ساخت فوم زیستی نشاسته کاساوا تقویت شده با سلولز باکتریایی/ نانو ذرات روی [۶۸]، فوم پلی لاکتیک اسید/ میکروفیبریل سلولز/ کربنات کلسیم/ نشاسته [۶۹]، فوم نانوفیبریل سلولز [۵۳]، نانو کامپوزیت بر پایه نانو رس و نانومیکرو کریستالین سلولز [۷۰]، فوم های ضد میکروبی نانو سلولز/ نیسین [۵۷]، فوم نانو سلولز ضد میکروبی [۷۱]، فوم نانو سلولز/ پلی وینیل الکل/ بوراکس [۷۲]، آرد چوب/ پلی اتیلن با چگالی پایین/ نانو رس [۷۳]، فوم نشاسته/ فیبر/ پلی لاکتیک اسید [۷۴]، نشاسته/ پلی لاکتیک اسید/ فیبر بامبو [۷۵]، پلی لاکتیک اسید/ نشاسته گرمانرم و یا نشاسته [۷۶]، [۷۷]، [۷۸]، [۷۹]، پلی لاکتیک اسید/ پلی بوتیلن آدیپیت کو ترفتالات [۸۰]، [۸۱]، [۸۲]، سینی های زیست تخریب پذیر نشاسته گرمانرم/ پلی لاکتیک اسید/ موم زنبور عسل [۶۷]، نشاسته کاساوا/ فیبر پالم [۸۳]، فوم زیستی نشاسته کاساوا تقویت شده با فیبر کتان [۸۴]، سینی های زیست تخریب پذیر بر پایه نشاسته [۸۵]، نشاسته و کربنات کلسیم [۸۶]، استات نشاسته / پلی

ژاو و همکاران [۱۰۳] فوم کامپوزیت سلولز پلی وینیل آمید میکروفیبریل شده با روش فوم اکستروژن پیوسته که در آن دی‌اکسید کربن فوق بحرانی به‌عنوان یک عامل دمنده عمل می‌کند و منجر به یک پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر با ساختار سلولی یکنواخت و چگالی بالا می‌شود مطالعه نمودند. میزان بالای دی‌اکسید کربن و دمای قالب پایین باعث افزایش تراکم سلولی می‌شود

در تمام روش‌هایی که در بالا مورد بحث قرار گرفت، شرایط فرآیند برای به دست آوردن ساختارهای سلولی مورد نظر بسیار حیاتی بود بنابراین، پیشنهاد می‌شود بهینه‌سازی دقیق شرایط مورد نیاز برای ارائه عملکرد بهتر انجام شود. برای این منظور باید درک مناسبی از مواد دانست، بنابراین می‌توان فوم‌های مورد نظر را در صورت نیاز سنتز و ترکیب نمود [۱۰۰].

تجزیه بیولوژیکی فوم‌های پلیمری مبتنی بر سلولز ارزیابی شده است و مشخص شده است که عوامل متعددی مانند ماهیت ماده، به‌عنوان مثال، بی‌شکلی یا بلوره‌ای بودن آن، وزن مولکولی، ساختار پلیمری، آب‌گریزی و غیره تا حد زیادی بر تجزیه زیستی مواد پلیمری تأثیر می‌گذارند. در نظر گرفتن توانایی تخریب فوم‌های پلیمری به مورفولوژی سلول نیز بستگی دارد؛ یعنی برای سلول‌های بسته، قرار گرفتن در معرض سطح به سمت عامل تجزیه‌کننده زیستی در مقایسه با ساختار متخلخل کمتر خواهد بود، از این رو تجزیه زیستی کامل به‌طور مؤثر در حالت دوم در مدت زمان کمتری رخ می‌دهد. نتایج مختلف نشان می‌دهد که نانو ساختار سلولزی به دلیل حساسیت زیاد آن نسبت به میکروارگانیسم‌های موجود در محیط، تجزیه‌پذیری زیستی مواد فوم را افزایش می‌دهد.

۵- چالش‌ها در توسعه پلاستیک‌های زیستی

۵-۱- چالش هزینه‌ها

یکی از چالش‌های اصلی مرتبط با توسعه پلاستیک‌های زیستی، انتخاب مواد اولیه است. طبق نظر رز و وروپ [۱۰۴] این چالش با مطرح کردن سه دلیل در نظر گرفته می‌شود:

(۱) هزینه‌های بستر، ۴۰ تا ۶۰ درصد از کل هزینه‌های

محصولات مبتنی بر زیست را تشکیل می‌دهد

کاهش می‌یابد. ریزساختار سلولی فوم‌ها نیز با افزایش فشار تغییر می‌کند؛ بنابراین، با کنترل دقیق شرایط فرآیند فشار، می‌توان فوم‌های کامپوزیت نانو الیاف سلولزی تولید کرد. کو و همکاران [۶۳] فوم‌های نانو بلوره‌ای پلی لاکتیک اسید/ سلولز را به روش القای دما تهیه کردند. در این مطالعه دی‌اکسید کربن به‌عنوان یک عامل دمنده استفاده شد و آزمایش‌هایی برای سه شکل از نانوبلورهای سلولز انجام شد. در این مورد، وجود نانو ساختارهای سلولزی نیز به‌شدت بر مورفولوژی و ساختار سلول تأثیر می‌گذارد که به‌نوبه خود خواص مکانیکی و استحکام کششی آن‌ها را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. فرآیند دسته‌ای ارزان‌ترین روش در بین همه روش‌ها است

فوم تزریقی می‌تواند دو نوع باشد: فرآیند کم‌فشار و فرآیند پرفشار و برای تولید فوم‌هایی با اشکال مختلف استفاده می‌شود. افزودن نانو ساختار سلولز منجر به بهبود تراکم سلولی و اندازه سلول می‌شود. علاوه بر مزایای بسیاری مانند مدت‌زمان فرآیند کمتر، اشکال اصلی که با آن مواجه هستیم، ریز ساختار غیریکنواخت سلولی به دلیل محدوده چگالی کم و هسته‌زایی است. در تمام مطالعات، از سیالات فوق بحرانی مانند نیتروژن فوق بحرانی استفاده می‌شود [۱۰۱].

می و همکاران [۱۰۲] فوم‌های نانو بلوره پلی (۴-کاپرولاکتون)/ سلولز را از طریق فرآیند قالب‌گیری تزریقی میکرو سلولی تهیه کردند و مشاهده نمودند که سلول‌های غیریکنواخت وجود دارد و این به دلیل زمان سرد شدن نامنظم، جریان برشی و طراحی قالب است و در نتیجه کل عملکرد فوم حاصل ممکن است به دلیل تفاوت در اندازه سلول‌ها متفاوت باشد. زیست‌سازگاری فوم‌ها نیز خوب بود؛ بنابراین، برای به دست آوردن فوم‌هایی با اندازه سلولی یکنواخت با تراکم سلولی بالا، باید پارامترهای فرآیند را بهینه کرد. فوم اکستروژن معمولاً در مواردی که به آماده‌سازی صنعتی در مقیاس بزرگ نیاز است استفاده می‌شود. این یک فرآیند پیوسته است و شبیه اکستروژن معمولی است. عوامل متعددی مانند دمای فرآیند، دمای قالب، هندسه قالب و فشار نقش مهمی بر روی خواص سلولی مانند چگالی و ریزساختار در فوم به روش اکستروژن دارند.

محصولات کشاورزی (کربوهیدرات ها و مواد گیاهی) منبع اصلی برای به دست آوردن پلاستیک های زیستی است. با این حال، استفاده از ریز جلبک ها برای این منظور به عنوان نسل بعدی صنعت، به دلیل امکان قرار گرفتن در زمین های غیر زراعی در حال ظهور است [۱۰۵]. علاوه بر زیست توده بالای آن، توانایی رشد در طیف وسیعی از محیط ها، مقرون به صرفه بودن، عدم اتکا به مواد شیمیایی و کاهش اثر بر زنجیره غذایی وجود دارد [۱۰۶].

به همین ترتیب، ریز جلبک ها می توانند به گسترش ظرفیت فتوسنتزی جهانی کمک کنند، جایی که توانایی تبدیل دی اکسید کربن به مواد خام برای پلاستیک های زیستی افزایش می یابد. در عین حال، محلول های نمکی و/یا فاضلاب را می توان به کاربرد و بازیافت مؤثر مواد مغذی (مانند نیتروژن و فسفر) را در سامانه های محتوی امکان پذیر کرد، در نتیجه باعث کاهش اتروفیکاسیون و وابستگی به کودهای شیمیایی پراثر می شود [۱۰۵]. در مواجهه با فرآیندهای تولید پلاستیک زیستی از ریز جلبک ها، دو رویکرد اصلی را می توان در نظر گرفت. از یک طرف، پلاستیک های زیستی را می توان با مخلوط کردن زیست توده ریز جلبک، پلیمرها و مواد افزودنی تبدیل شده با روش های ترمومکانیکی مانند قالب گیری فشاری به دست آورد. رویکرد دیگر بر روی کشت پلیمرهای زیستی مانند پلی هیدرو کسی بوتیرات^۱ (PHB) در سلول های میکرو جلبکی متمرکز است که برای تولید پلاستیک های زیستی استخراج و فرآیند می شوند [۱۰۷]. در عین حال، محلول های نمکی و/یا فاضلاب را می توان به کاربرد و بازیافت مؤثر مواد مغذی (مانند نیتروژن و فسفر) را در سامانه های محتوی امکان پذیر کرد، در نتیجه باعث روند کاهش اتروفیکاسیون و وابستگی به کودهای شیمیایی می شود [۱۰۵]. گونه های کلرلا و اسپیرولینا بیشترین کاربرد را برای تولید پلیمرهای زیستی و مخلوط های پلاستیکی دارند؛ اما با توجه به بررسی مطالعات انجام شده توسط اون و همکاران [۱۰۲] هنوز نیاز به تشویق این نوع توسعه وجود دارد که به غلبه بر موانع موجود بر سر راه پایداری اقتصادی صنعت کمک می کند. برای این منظور، نویسندگان مفهوم پالایشگاه زیستی را پیشنهاد می کنند که در آن پلاستیک زیستی از

(۲) بازده کلی تولید مونومرهای مبتنی بر زیست، به طور قابل توجهی کمتر از مونومرهایی است که از نفت به دست می آیند.

(۳) رقابت با مواد خام برای تولید محصولات غذایی و شیمیایی مبتنی بر زیستی. به این معنا که تمایل به کشف جایگزین های مختلف مواد خام مانند ضایعات مواد غذایی وجود دارد.

با در نظر گرفتن اولین نکته مطرح شده توسط ورز و ورلوپ [۱۰۴]، در مورد هزینه ها، سایر محققین موافق هستند که این مورد یک عنصر کلیدی برای توسعه صنعت است، همچنین هزینه های تولید پلاستیک های زیستی به طور کلی بالاتر از هزینه های پلاستیک های معمولی است.

در ارتباط با پلاستیک های مصنوعی، دو راه برای رسیدگی به مشکل زیست محیطی وجود دارد. از یک سو می توان استفاده از پلاستیک مصنوعی را ممنوع یا کنترل کرد و از سوی دیگر جایگزینی برای آن ایجاد نمود. اشکال دوم در دستیابی به قیمت رقابتی در مقایسه با پلاستیک های مصنوعی است. دستیابی به پلاستیک های زیستی ارزان قیمت نشان دهنده یک چالش طولانی مدت است. این امر نه تنها شامل هزینه های تولید می شود، بلکه شامل هزینه های خارجی نیز می شود، از جمله هزینه بازیافت، تخریب محیط زیست و هزینه های مرتبط با سلامت که نیاز به مقررات بهتری دارند که در صورت تصویب می تواند فرصتی برای گنجاندن پلاستیک های زیستی در پویایی چرخه اقتصاد زیستی باشد؛ بنابراین، تلاش برای کاهش تفاوت قیمت بین محصولات پلاستیکی زیستی و محصولات پلاستیکی معمولی، توانایی جایگزینی پلاستیک های زیستی را به جای پلاستیک های مصنوعی افزایش می دهد. مسیری که مناسب ترین راه به نظر می رسد، توسعه، صرفه جویی در مقیاس و کارایی تولید، همراه با ابتکارات پیرامون تحقیق و نوآوری و شناسایی روش های تولید می تواند کارآمد باشد [۱۰۵].

۶- مسیرهای جدید برای به دست آوردن پلاستیک های زیستی

برای کشف جایگزین های دیگر برای به دست آوردن پلاستیک های زیستی، ابتکارات برای کار و تحقیق با فرآیندهای جدید و متنوع افزایش یافته است. در حال حاضر، مواد خام بر پایه

^۱ Poly HydroxyButylate

توسعه داده‌اند و انتظار می‌رود با افزایش جذابیت در بازار، پیشرفت نیز حاصل شود. از سوی دیگر، پویایی ترجیحات مصرف‌کننده نسبت به مواد سازگار با محیط زیست، عملکرد بهبود یافته پلاستیک‌های زیستی و معرفی پلاستیک‌های زیستی تولید شده از منابع بیولوژیکی، کلیدی برای افزایش تقاضای بازار بوده است. به همین ترتیب، زنجیره ارزش صنعت پلاستیک‌های زیستی را نیز می‌توان با فعالیت افراد مختلف درگیر از تولید مواد اولیه، ساخت محصول اولیه و نهایی و توزیع و فروش آن به مصرف‌کننده نهایی بیان کرد. اولین حلقه در این زنجیره توسط تولیدکنندگان محصولات کشاورزی، ناشاسته، روغن نباتی، خمیر کاغذ، شکر و سلولز چوب و شرکت‌های بیوشیمیایی که پلیمرهای پلاستیک‌های زیستی را به شکل اولیه تولید می‌کنند، اشغال می‌شود. این محصولات اولیه معمولاً به صورت رزین به شرکت‌هایی فروخته می‌شود که این رزین‌ها را به محصول نهایی تبدیل می‌کنند. در این مرحله، مبدل ممکن است محصول را مستقیماً به کاربران نهایی یا تاجران عمده‌فروشی که ممکن است محصول را به شرکت‌های خدمات غذایی یا خرده‌فروشی بفروشند، بفروشد. همچنین لازم است عوامل مرتبط با دفع نهایی پلاستیک‌های زیستی پس از پایان عمر مفید خود، مورد بررسی قرار گیرند [۱۱۱].

۸- تخصیص اجتماعی برای پلاستیک‌های زیستی

در چارچوب زنجیره ارزش پلاستیک‌های زیستی، نباید فراموش کرد که جریان‌های بین حلقه‌ها، مانند مواد اولیه، بخش مالی و اطلاعات فناورانه وجود دارد که انسان در آن‌ها تأثیر کامل دارد. در صنعتی مانند این صنعت که هدف آن ایجاد الگوهای تغییر در مواجهه با شیوه‌های پذیرفته شده معمول مانند استفاده از پلاستیک‌های مشتق شده از نفت است، ارتقای فعالیت‌هایی برای ایجاد آگاهی در بین مشتریان و تجار ضروری خواهد بود. اگرچه بخش بزرگی از چالش‌های فناورانه صنعت مبتنی بر جستجوی راه‌حل‌های مناسب برای به دست آوردن پلیمرها است، ایجاد تعاملات برای توسعه راه‌حل‌هایی برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از بسته‌بندی‌های ساخته شده از منابع پتروشیمی مهم است. در دنیا تقریباً ۹۰ درصد زباله‌های جامد فقط دفع می‌شوند، اما استفاده نمی‌شوند و تولید و انباشت

محصولات جانبی تولیدات شیمیایی با ارزش بالا از ریز جلبک‌ها تولید می‌شود.

منابع ضایعاتی که می‌توان برای تولید پلی هیدرو کسی آلکانات^۱ (PHA) استفاده کرد عبارت‌اند از فاضلاب خانگی، ضایعات مواد غذایی، ملاس، پساب کارخانه روغن‌زیتون، پساب کارخانه روغن پالم، زیست‌توده سلولزی لیگنو، زباله‌های کنسروسازی، زباله‌های صنعت بیودیزل، ضایعات روغن پخت‌وپز، فاضلاب کارخانه کاغذ و لجن، استفاده از جلبک‌ها به عنوان خوراک، ضایعات قهوه و آب پنی [۱۰۸]؛ بنابراین، کار با جلبک‌ها برای به دست آوردن پلاستیک‌های زیستی روند رو به رشد و جالبی را برای فرآیندهای تحقیق و نوآوری نشان می‌دهد. با این حال، تولید PHB با استفاده از سیانوباکتری‌ها نیز به عنوان یک مسیر مهم برای تثبیت این صنعت در حال ظهور است، دو عامل کلیدی، بهره‌وری بالاتر PHB و تجهیزات ارزان تر کشت سیانوباکتری برای دستیابی به سودآوری بالاتر مورد نیاز است. در این راستا، ابتکارات مرتبط با غربالگری، اصلاح ژنتیکی، کشت فاضلاب، پردازش پایین دست و بهینه‌سازی رشد، فرصت‌های قابل توجهی را برای بهبود قابلیت حیات PHB به دست آمده از سیانوباکتری‌ها نشان می‌دهد [۱۰۹]. با توجه به نگرانی و علاقه به کاهش هزینه‌ها، کاوش در مسیرهای بیوتکنولوژیکی جدید و کاهش اثرات زیست‌محیطی مرتبط با کاربری زمین، امکان‌هایی نیز برای استفاده از پسماندهای فرآیندهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از آنجایی که پلاستیک‌های زیستی به عنوان یک جایگزین پایدار درجایی که تولید آن‌ها نباید منابع غذایی بالقوه را مختل کند، تبلیغ می‌شود علاوه بر کمک به کاهش دفع زباله یا سوزاندن دفن زباله، از اصل استفاده مجدد نیز به اقتصاد کمک می‌کند [۱۱۰].

۷- پیشرفت در صنعت پلاستیک‌های زیستی

صنعت پلاستیک‌های زیستی مانند هر صنعت دیگری، تعدادی از عوامل داخلی و خارجی وجود دارد که بر رشد پلاستیک‌های زیستی تأثیر می‌گذارد. صنایع برای دستیابی به پیشرفت‌هایی در ویژگی‌های فنی و عملکرد پلاستیک‌های زیستی، ابتکاراتی را

² Polyhydroxyalkanoates

الیاف نشاسته خالص باعث ایجاد کامپوزیت ها یا ترکیب با سایر الیاف طبیعی و پلیمرهای زیستی با ویژگی های پیشرفته می شود. فوم های مبتنی بر مواد سلولزی نیز به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی فوق العاده ای که دارند مورد توجه قرار گرفته اند. فوم های نانو کامپوزیتی مبتنی بر سلولز با ویژگی های بهبود یافته موضوعی داغ در تحقیقات و صنایع هستند. بازار زیست تخریب پذیر یا کمپوست بستری خوب و تمیز برای مواد پایدار فراهم می کند که رشد اقتصادی صنایع را با روندهای اخیر افزایش می دهد. این بررسی چندین راهبرد مورد استفاده محققان را برای بدست آوردن موادی که قابل مقایسه با پلی استایرن منبسط شده هستند را نشان می دهد در این مطالعه راهبردهایی مانند تهیه فوم با استفاده از تکنیک های ساخت متفاوت، افزودن الیاف یا بقایای کشاورزی، افزودن مواد کف ساز به پلیمر، تجزیه زیستی، تراکم سلولی و تخلخل بیوفوم، خواص مکانیکی و ممانعتی و ریز ساختار سطحی آن را ارائه می دهد. فوم های بر پایه نشاسته و سلولز و سایر پسماندهای کشاورزی مواردی هستند که می توان در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار داد زیرا مطالعات کمی در این زمینه وجود دارد.

۱۰- مراجع

- [1] V. Behshad and N. Sedaghat, "The evolution of modified atmosphere packaging," *Sci.J. Pack.Sci.Art.* vol. 14, no. 55, pp. 63-69, 2023, In persion, dor: 20.1001.1.22286675.1402.14.55.6.4
- [2] N. Sedaghat and P. boghori, "New achievements of biodegradable protein plastics vol," *Sci.J. Pack.Sci.Art.* vol. 14, no. 55, pp. 63-69, 2022 In persion, dor: 20.1001.1.22286675.1401.13.52.4.9
- [3] P. X. Ma and R. Langer, "Fabrication of Biodegradable Polymer Foams for Cell Transplantation and Tissue Engineering," *Tissue Eng.*, pp. 47-56, 2003, doi: 10.1385/0-89603-516-6:47.
- [4] Y. zhang, Zh. Chang, W. Luo, Sh. Gu, W. Li, and J. An, "Effect of starch particles on foam stability and dilational viscoelasticity of aqueous-foam," *Ch. J. Chem. Engin.*, vol. 23, no. 1, pp. 276-280, 2015. doi: 10.1016/j.cjche.2014.10.015
- [5] M. Avella, M. Cocca, M. E. Errico, and G. Gentile, "Polyvinyl alcohol biodegradable foams containing cellulose fibres," *J. Cell. Plast.*, vol. 48, no. 5, pp. 459-470, 2012, doi: 10.1177/0021955X12449639.
- [6] C. Demitri et al., "Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing," *Interface Focus*, vol. 4, no. 1, 2014, doi: 10.1098/rsfs.2013.0053.
- [7] M. Avella, M. Cocca, M. E. Errico, and G. Gentile, "Biodegradable PVOH-based foams for packaging applications," *J. Cell. Plast.*, vol. 47, no. 3, pp. 271-281, 2011, doi: 10.1177/0021955X11407401.
- [8] Z. Fang et al., "Development of High-Performance Biodegradable Rigid Polyurethane Foams Using Full Modified

زباله های یک بار مصرف یا پلاستیکی مشکل را افزایش می دهد، به ویژه زمانی که ۵۰ درصد این مواد یک بار مصرف هستند. بر این اساس، سرمایه گذاری در توسعه پلاستیک های زیستی با توجه به تأثیر منفی توصیف شده و مقررات ملی و بین المللی جاری که به دنبال کاهش استفاده از پلاستیک های معمولی هستند، مناسب است. با توجه به اینکه صرف طراحی یا ایجاد توسعه های جدید کافی نیست نیاز به ارتقای حیات آن ها در کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت است. از این نظر، همکاری بین تولیدکنندگان بسته بندی پلاستیک زیستی و تولیدکنندگان محصول باید عملکرد محصول و نوآوری در فناوری های بسته بندی را بهبود بخشد. بر این اساس، نتایج مثبت را می توان در قالب نوآوری محصول، افزایش قابلیت های نوآورانه شرکت و عملکرد شرکت از طریق طراحی مشترک افزایش داد این قابلیت را می توان با یادگیری در مورد نیازهای مشتری، بهبود عملیات، روابط قوی تر با مشتری و ایجاد محصولات نوآورانه ارتقا داد در نهایت، با تأیید پیشرفت ها توسط پذیرندگان اولیه، می توان از رسیدن خطاها به صنعت جلوگیری کرد، زیرا یک فرآیند مداوم و تکراری کشف و اعتبار، از طریق طراحی مشترک، امکان حذف عدم قطعیت ها و استفاده کارآمد از منابع را فراهم می کند [۱۱۲].

۹- نتیجه گیری

معرفی فوم زیست تخریب پذیر گامی برجسته در مسیر استفاده از مواد سبز در صنایع بسته بندی، زیست پزشکی و حمل و نقل است. پلیمرهای معمولی مانند پلی استایرن منبسط شده، پلی پروپیلن منبسط شده و غیره با منشأ تجدید ناپذیر و طبیعت غیر قابل تجزیه مشکلات زیست محیطی شدیدی ایجاد می کنند. قیمت بالا و کاهش در دسترس بودن مواد مشتق شده از سوخت های فسیلی نیز به دلایل بسیاری استفاده از پلیمرهای مصنوعی را محدود می کند. این امر باعث افزایش تقاضا برای گزینه های جایگزین با مسیرهای اقتصادی و زیست محیطی سودمند در صنایع شده است. فوم های پلیمری طبیعی سازگار با محیط زیست چهره بسته بندی، پزشکی، خودرو، لجستیک و سایر کاربردهای کوتاه مدت را تغییر داده است. فوم های نشاسته ای به دلیل عایق حرارتی خوب، جذب رطوبت عالی و هزینه کم، گزینه اصلی به عنوان فوم های الیاف طبیعی هستند. آب دوستی و شکنندگی

- parameters, structure and properties," *Ind. Crops Prod.*, vol. 16, no. 1, pp. 69–79, 2002, doi: 10.1016/S0926-6690(02)00010-9.
- [24] Y. Zhang, C. Li, X. Fu, N. Ma, X. Bao, and H. Liu, "Characterization of a novel starch-based foam with a tunable release of oxygen," *Food Chem.*, vol. 389, no. April, p. 133062, 2022, doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133062.
- [25] P. Alban-bolaños, U. Cauca, A. A. Ayala-aponte, H. S. Villada-castillo, U. Cauca, and F. Ávalos-belmonte, "Biodegradable flexible foam: novel material based on cassava TPS obtained by extrusion," pp. 1–25, 2023, doi:10.21203/rs.3.rs-3299098/v1
- [26] V. Velasco, E. Sepúlveda, P. Williams, S. Rodríguez-Llamazares, C. Gutiérrez, and N. Valderrama, "Starch-based composite foam for chicken meat packaging," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 59, no. 12, pp. 4594–4602, 2022, doi: 10.1007/s13197-022-05538-6.
- [27] B. Abbès et al., "Novel extruded starch-beet pulp composites for packaging foams," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 7, 2020, doi: 10.3390/ma13071571.
- [28] F. Kahvand and M. Fasihi, "Microstructure and physical properties of thermoplastic corn starch foams as influenced by polyvinyl alcohol and plasticizer contents," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 157, pp. 359–367, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.04.222.
- [29] N. Kaisangsri, R. J. Kowalski, O. Kerdchoechuen, N. Laohakunjit, and G. M. Ganjyal, "Cellulose fiber enhances the physical characteristics of extruded biodegradable cassava starch foams," *Ind. Crops Prod.*, vol. 142, no. October 2018, p. 111810, 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111810.
- [30] Q. Fang and M. A. Hanna, "Functional properties of polylactic acid starch-based loose-fill packaging foams," *Cereal Chem.*, vol. 77, no. 6, pp. 779–783, 2000, doi: 10.1094/CCHEM.2000.77.6.779.
- [31] A. Georges, C. Lacoste, and E. Damien, "Effect of formulation and process on the extrudability of starch-based foam cushions," *Ind. Crops Prod.*, vol. 115, no. January, pp. 306–314, 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.02.001.
- [32] F. Liu et al., "Effects of polyvinyl alcohol content and hydrolysis degree on the structure and properties of extruded starch-based foams," *Chem. Eng. J.*, vol. 472, no. July, p. 144959, 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.144959.
- [33] S. Vorawongsagul, P. Pratumpong, and C. Pechyen, "Preparation and foaming behavior of poly (lactic acid)/poly (butylene succinate)/cellulose fiber composite for hot cups packaging application," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 27, no. December 2020, p. 100608, 2021, doi: 10.1016/j.foodpsl.2020.100608.
- [34] M. Martínez-Sanz et al., "Nano-/microstructure of extruded Spirulina/starch foams in relation to their textural properties," *Food Hydrocoll.*, vol. 103, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105697.
- [35] G. M. Glenn and W. J. Orts, "Properties of starch-based foam formed by compression/explosion processing," *Ind. Crops Prod.*, vol. 13, no. 2, pp. 135–143, 2001, doi: 10.1016/S0926-6690(00)00060-1.
- [36] N. Soykeabkaew, P. Supaphol, and R. Rujiravanit, "Preparation and characterization of jute-and flax-reinforced starch-based composite foams," *Carbohydr. Polym.*, vol. 58, no. 1, pp. 53–63, 2004, doi: 10.1016/j.carbpol.2004.06.037.
- [37] A. E. S. Vercelheze et al., "Properties of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite," *Soy-Based Polyols*," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 67, no. 8, pp. 2220–2226, 2019, doi: 10.1021/acs.jafc.8b05342.
- [9] B. F. Bergel, L. M. da Luz, and R. M. C. Santana, "Effect of poly(lactic acid) coating on mechanical and physical properties of thermoplastic starch foams from potato starch," *Prog. Org. Coatings*, vol. 118, no. July 2017, pp. 91–96, 2018, doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.01.029.
- [10] M. Neus Angles and A. Dufresne, "Plasticized starch/tuniecie whiskers nanocomposites. 1. Structural analysis," *Macromolecules*, vol. 33, no. 22, pp. 8344–8353, 2000, doi: 10.1021/ma0008701.
- [11] S. Pérez, P. M. Baldwin, and D. J. Gallant, *Structural Features of Starch Granules I*, Third Edit. Elsevier Inc., 2009. doi: 10.1016/B978-0-12-746275-2.00005-7.
- [12] R. L. Shogren, "Effect of moisture content on the melting and subsequent physical aging of cornstarch," *Carbohydr. Polym.*, vol. 19, no. 2, pp. 83–90, 1992, doi: 10.1016/0144-8617(92)90117-9.
- [13] C. M. Machado, P. Benelli, and I. C. Tessaro, "Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 147, no. xxxx, pp. 1343–1353, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.10.098.
- [14] A. M. Sarmiento, H. L. Guzmán, G. Morales, D. E. Romero, and A. Y. Pataquiva-Mateus, "Expanded Polystyrene (EPS) and Waste Cooking Oil (WCO): From Urban Wastes to Potential Material of Construction," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 7, no. 5, pp. 1245–1254, 2016, doi: 10.1007/s12649-016-9511-7.
- [15] C. M. Machado, P. Benelli, and I. C. Tessaro, "Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use," *Ind. Crops Prod.*, vol. 102, pp. 115–121, 2017, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.03.007.
- [16] K. Kaewtatip, M. Pongroi, B. Holló, and K. Mészáros Szécsényi, "Effects of starch types on the properties of baked starch foams," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 115, no. 1, pp. 833–840, 2014, doi: 10.1007/s10973-013-3149-5.
- [17] N. Kaisangsri, O. Kerdchoechuen, and N. Laohakunjit, "Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan," *Ind. Crops Prod.*, vol. 37, no. 1, pp. 542–546, 2012, doi: 10.1016/j.indcrop.2011.07.034.
- [18] C. da S. Figueiró, C. I. W. Calcagno, and R. M. C. Santana, "Starch Foams and Their Additives: A Brief Review," *Starch/Stärke*, vol. 2300012, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1002/star.202300012.
- [19] J. B. Engel, A. Ambrosi, and I. C. Tessaro, "Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging," *Carbohydr. Polym.*, vol. 225, no. May, p. 115234, 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115234.
- [20] J. Guan and M. A. Hanna, "Selected morphological and functional properties of extruded acetylated starch-cellulose foams," *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 14, pp. 1716–1726, 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2004.09.017.
- [21] F. Robin, C. Dubois, N. Pineau, H. P. Schuchmann, and S. Palzer, "Expansion mechanism of extruded foams supplemented with wheat bran," *J. Food Eng.*, vol. 107, no. 1, pp. 80–89, 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.05.041.
- [22] H. A. Pushpadass, G. S. Babu, R. W. Weber, and M. A. Hanna, "Extrusion of starch-based loose-fill packaging foams#: Effects of temperature, moisture and talc on physical properties," *Packag. Technol. Sci.*, vol. 21, no. 3, pp. 171–183, 2008, doi: 10.1002/pts.809.
- [23] R. L. Shogren, J. W. Lawton, and K. F. Tiefenbacher, "Baked starch foams: Starch modifications and additives improve process

- [53]B. Lu, Q. Lin, Z. Yin, F. Lin, X. Chen, and B. Huang, "Robust and lightweight biofoam based on cellulose nanofibrils for high-efficient methylene blue adsorption," *Cellulose*, vol. 28, no. 1, pp. 273–288, 2021, doi: 10.1007/s10570-020-03553-4.
- [54]Y. Xu and M. A. Hanna, "Preparation and properties of biodegradable foams from starch acetate and poly(tetramethylene adipate-co-terephthalate)," *Carbohydr. Polym.*, vol. 59, no. 4, pp. 521–529, 2005, doi: 10.1016/j.carbpol.2004.11.007.
- [55]J. Guan, K. M. Eskridge, and M. A. Hanna, "Acetylated starch-poly(lactic acid) loose-fill packaging materials," *Ind. Crops Prod.*, vol. 22, no. 2, pp. 109–123, 2005, doi: 10.1016/j.indcrop.2004.06.004.
- [56]K. Manoi and S. S. H. Rizvi, "Physicochemical characteristics of phosphorylated cross-linked starch produced by reactive supercritical fluid extrusion," *Carbohydr. Polym.*, vol. 81, no. 3, pp. 687–694, 2010, doi: 10.1016/j.carbpol.2010.03.042.
- [57]P. Lu, H. Zhao, M. Zhang, X. Bi, X. Ge, and M. Wu, "Thermal insulation and antibacterial foam templated from bagasse nanocellulose /nisin complex stabilized Pickering emulsion," *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 220, no. April, p. 112881, 2022, doi: 10.1016/j.colsurfb.2022.112881.
- [58]J. Shey, S. H. Imam, G. M. Glenn, and W. J. Orts, "Properties of baked starch foam with natural rubber latex," *Ind. Crops Prod.*, vol. 24, no. 1, pp. 34–40, 2006, doi: 10.1016/j.indcrop.2005.12.001.
- [59]N. Kaisangsri, O. Kerchoechuen, and N. Laohakunjit, "Characterization of cassava starch based foam blended with plant proteins, kraft fiber, and palm oil," *Carbohydr. Polym.*, vol. 110, pp. 70–77, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.03.067.
- [60]A. Da Silva, L. M. Nievola, C. A. Tischer, S. Mali, and P. C. S. Faria-Tischer, "Cassava starch-based foams reinforced with bacterial cellulose," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 130, no. 5, pp. 3043–3049, 2013, doi: 10.1002/app.39526.
- [61]J. W. Lawton, R. L. Shogren, and K. F. Tiefenbacher, "Aspen fiber addition improves the mechanical properties of baked cornstarch foams," *Ind. Crops Prod.*, vol. 19, no. 1, pp. 41–48, 2004, doi: 10.1016/S0926-6690(03)00079-7.
- [62]S. Y. Lee, H. Chen, and M. A. Hanna, "Preparation and characterization of tapioca starch-poly(lactic acid) nanocomposite foams by melt intercalation based on clay type," *Ind. Crops Prod.*, vol. 28, no. 1, pp. 95–106, 2008, doi: 10.1016/j.indcrop.2008.01.009.
- [63]Y. Qiu et al., "Cyclic tensile properties of the polylactide nanocomposite foams containing cellulose nanocrystals," *Cellulose*, vol. 25, no. 3, pp. 1795–1807, 2018, doi: 10.1007/s10570-018-1703-9.
- [64]L. Wang and M. Sánchez-Soto, "Green bio-based aerogels prepared from recycled cellulose fiber suspensions," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 40, pp. 31384–31391, 2015, doi: 10.1039/c5ra02981c.
- [65]R. Mohammadinejad, S. Karimi, S. Irvani, and R. S. Varma, "Plant-derived nanostructures: types and applications," *Green Chem.*, vol. 18, no. 1, pp. 20–52, 2015, doi: 10.1039/c5gc01403d.
- [66]N. Lavoine and L. Bergström, "Nanocellulose-based foams and aerogels: Processing, properties, and applications," *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 31, pp. 16105–16117, 2017, doi: 10.1039/c7ta02807e.
- [67]M. O. Reis, J. B. Olivato, A. P. Bilck, J. Zanela, M. V. E. Grossmann, and F. Yamashita, "Biodegradable trays of thermoplastic starch/poly (lactic acid) coated with beeswax," *Ind. Crops Prod.*, vol. 112, no. December 2016, pp. 481–487, 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.12.045.
- [38]B. F. Bergel, L. L. Araujo, and R. M. C. Santana, "Effects of the addition of cotton fibers and cotton microfibrils on the structure and mechanical properties of starch foams made from potato starch," *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, vol. 2, p. 100167, 2021, doi: 10.1016/j.carpta.2021.100167.
- [39]T. C. Sunarti, H. Integrani, and K. Syamsu, "Effect of Cocopeat Addition to Some Properties of Cassava Starch-Based Foam," *Macromol. Symp.*, vol. 353, no. 1, pp. 133–138, 2015, doi: 10.1002/masy.201550318.
- [40]C. Boischot, C. I. Moraru, and J. L. Kokini, "Factors that influence the microwave expansion of glassy amylopectin extrudates," *Cereal Chem.*, vol. 80, no. 1, pp. 56–61, 2003, doi: 10.1094/CCHEM.2003.80.1.56.
- [41]C. I. Moraru and J. L. Kokini, "Nucleation and Expansion During Extrusion and Microwave Heating of Cereal Foods," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 2, no. 4, pp. 147–165, 2003, doi: 10.1111/j.1541-4337.2003.tb00020.x.
- [42]M. Sjöqvist and P. Gatenholm, "The effect of starch composition on structure of foams prepared by microwave treatment," *J. Polym. Environ.*, vol. 13, no. 1, pp. 29–37, 2005, doi: 10.1007/s10924-004-1213-8.
- [43]J. Zhou, J. Song, and R. Parker, "Microwave-assisted moulding using expandable extruded pellets from wheat flours and starch," *Carbohydr. Polym.*, vol. 69, no. 3, pp. 445–454, 2007, doi: 10.1016/j.carbpol.2007.01.001.
- [44]A. Lopez-Gil, F. Silva-Bellucci, D. Velasco, M. Ardanuy, and M. A. Rodriguez-Perez, "Cellular structure and mechanical properties of starch-based foamed blocks reinforced with natural fibers and produced by microwave heating," *Ind. Crops Prod.*, vol. 66, pp. 194–205, 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.12.025.
- [45]M. K. Singh, S. Zafar, and M. Talha, "Development and characterisation of poly-L-lactide-based foams fabricated through microwave-assisted compression moulding," *J. Cell. Plast.*, vol. 55, no. 5, pp. 523–541, 2019, doi: 10.1177/0021955X19850728.
- [46]A. R. D. V. Morais et al., "Freeze-drying of emulsified systems: A review," *Int. J. Pharm.*, vol. 503, no. 1–2, pp. 102–114, 2016, doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.02.047.
- [47]N. Soykeabkaew, C. Thanomsilp, and O. Suwanton, A review: Starch-based composite foams, vol. 78, no. August. Elsevier Ltd, 2015. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.014.
- [48]J. D. Mathias, N. Tessier-Doyen, and P. Michaud, "Development of a chitosan-based biofoam: Application to the processing of a porous ceramic material," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 1175–1186, 2011, doi: 10.3390/ijms12021175.
- [49]X. C. Tang and M. J. Pikal, "Design of Freeze-Drying Processes for Pharmaceuticals: Practical Advice," vol. 21, no. 2, 2004. doi:10.1023/B:PHAM.0000016234.73023.75
- [50]S. H. Alavi, S. S. H. Rizvi, and P. Harriott, "Process dynamics of starch-based microcellular foams produced by supercritical fluid extrusion. I: Model development," *Food Res. Int.*, vol. 36, no. 4, pp. 309–319, 2003, doi: 10.1016/S0963-9969(02)00222-3.
- [51]M. Chauvet, M. Saucéau, F. Baillon, and J. Fages, "Blending and foaming thermoplastic starch with poly (lactic acid) by CO₂-aided hot melt extrusion," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 138, no. 14, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1002/app.50150.
- [52]C. Chang, M. Venkatesan, C. Cho, P. chung, J. chandrasekar, C. Lee, H. Wang, Ch. Wong, and Ch. Kuo, "Thermoplastic Starch with Poly (butylene adipate- co- terephthalate) blend foamed by supercritical carbon dioxid polymers," *Polym.*, vol. 14, no. 10, 1952, 2022, doi: 10.3390/polym14101952

- Adipate-co-Terephthalate) Blends Through Co-continuous Phase Morphology," *J. Polym. Environ.*, vol. 26, no. 9, pp. 3802–3816, 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1256-x.
- [82] E. Sritham, P. Phunsombat, and J. Chaishome, "Tensile properties of PLA/PBAT blends and PLA fibre-reinforced PBAT composite," *MATEC Web Conf.*, vol. 192, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201819203014.
- [83] A. Edhirej, S. M. Sapuan, M. Jawaid, and N. I. Zahari, "Cassava/sugar palm fiber reinforced cassava starch hybrid composites: Physical, thermal and structural properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 101, pp. 75–83, 2017, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.03.045.
- [84] W. Sanhawong, P. Banhalee, S. Boonsang, and S. Kaewpirom, "Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam," *Ind. Crops Prod.*, vol. 108, no. December 2016, pp. 756–766, 2017, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.07.046.
- [85] J. P. Cruz-Tirado, R. Vejarano, D. R. Tapia-Blácido, G. Barraza-Jáuregui, and R. Siche, "Biodegradable foam tray based on starches isolated from different Peruvian species," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 125, pp. 800–807, 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.12.111.
- [86] G. M. Glenn, W. J. Orts, and G. A. R. Nobes, "Starch, fiber and CaCo3 effects on the physical properties of foams made by a baking process," *Ind. Crops Prod.*, vol. 14, no. 3, pp. 201–212, 2001, doi: 10.1016/S0926-6690(01)00085-1.
- [87] D. Salarbashi et al., "Development of new active packaging film made from a soluble soybean polysaccharide incorporating ZnO nanoparticles," *Carbohydr. Polym.*, vol. 140, pp. 220–227, 2016, doi: 10.1016/j.carbpol.2015.12.043.
- [88] S. Shankar, X. Teng, G. Li, and J. W. Rhim, "Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films," *Food Hydrocoll.*, vol. 45, pp. 264–271, 2015, doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.12.001.
- [89] S. Ketkaew et al., "Effect of Oregano Essential Oil Content on Properties of Green Biocomposites Based on Cassava Starch and Sugarcane Bagasse for Bioactive Packaging," *J. Polym. Environ.*, vol. 26, no. 1, pp. 311–318, 2018, doi: 10.1007/s10924-017-0957-x.
- [90] J. P. Cruz-Tirado et al., "Bioactive Andean sweet potato starch-based foam incorporated with oregano or thyme essential oil," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 23, no. September 2019, p. 100457, 2020, doi: 10.1016/j.fpsl.2019.100457.
- [91] E. J. Jeong, C. K. Park, and S. H. Kim, "Fabrication of microcellular polylactide/modified silica nanocomposite foams," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 137, no. 17, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1002/app.48616.
- [92] K. Zhang et al., "Fabrication of highly interconnected porous poly(ϵ -caprolactone) scaffolds with supercritical CO₂ foaming and polymer leaching," *J. Mater. Sci.*, vol. 54, no. 6, pp. 5112–5126, 2019, doi: 10.1007/s10853-018-3166-7.
- [93] N. H. P. Rodrigues, J. T. de Souza, R. L. Rodrigues, M. H. G. Canteri, S. M. K. Tramontin, and A. C. de Francisco, "Starch-based foam packaging developed from a by-product of potato industrialization (*Solanum tuberosum* L.)," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 7, 2020, doi: 10.3390/app10072235.
- [94] J. C. Spada, S. F. Seibert, and I. C. Tessaro, "Impact of PLA Poly(Lactic Acid) and PBAT Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Coating on the Properties of Composites with High Content of Rice Husk," *J. Polym. Environ.*, vol. 29, no. 4, pp. 1324–1331, 2021, doi: 10.1007/s10924-020-01957-8.
- [68] M. A. Basuki, H. Suryanto, A. Larasati, P. Puspitasari, and Mujiono, "The effect of ZnO addition against crystallinity and water absorption capacity of biofoam based cassava starch reinforced bacterial cellulose," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2120, 2019, doi: 10.1063/1.5115692.
- [69] N. M. Moo-Tun, G. Iñiguez-Covarrubias, and A. Valadez-Gonzalez, "Assessing the effect of PLA, cellulose microfibrils and CaCO₃ on the properties of starch-based foams using a factorial design," *Polym. Test.*, vol. 86, no. February, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106482.
- [70] M. M. González del Campo, B. Caja-Munoz, M. Darder, P. Aranda, L. Vázquez, and E. Ruiz-Hitzky, "Ultrasound-assisted preparation of nanocomposites based on fibrous clay minerals and nanocellulose from microcrystalline cellulose," *Appl. Clay Sci.*, vol. 189, no. February, p. 105538, 2020, doi: 10.1016/j.clay.2020.105538.
- [71] A. F. Sousa et al., "Thermosetting AESO-bacterial cellulose nanocomposite foams with tailored mechanical properties obtained by Pickering emulsion templating," *Polymer (Guildf.)*, vol. 118, pp. 127–134, 2017, doi: 10.1016/j.polymer.2017.04.073.
- [72] J. Han et al., "Effects of nanocellulose on the structure and properties of poly(vinyl alcohol)-borax hybrid foams," *Cellulose*, vol. 24, no. 10, pp. 4433–4448, 2017, doi: 10.1007/s10570-017-1409-4.
- [73] F. Molkara, S. K. Najafi, and I. Ghasemi, "Foam morphology and sound transmission loss of foamed wood flour/low-density polyethylene (LDPE)/nanoclay composites," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 31, no. 11, pp. 1470–1482, 2018, doi: 10.1177/0892705717738298.
- [74] E. D. M. Teixeira et al., "Starch/fiber/poly(lactic acid) foam and compressed foam composites," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 13, pp. 6616–6623, 2014, doi: 10.1039/c3ra47395c.
- [75] M. Guan, Z. Zhang, C. Yong, and K. Du, "Interface compatibility and mechanisms of improved mechanical performance of starch/poly(lactic acid) blend reinforced by bamboo shoot shell fibers," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 35, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1002/app.47899.
- [76] M. Solati, A. Saeidi, and I. Ghasemi, "The effect of graphene nanoplatelets on dynamic properties, crystallization, and morphology of a biodegradable blend of poly(lactic acid)/thermoplastic starch," *Iran. Polym. J. (English Ed.)*, vol. 28, no. 8, pp. 649–658, 2019, doi: 10.1007/s13726-019-00731-5.
- [77] J. Muller, C. González-Martínez, and A. Chiralt, "Combination Of Poly(lactic) acid and starch for biodegradable food packaging," *Materials (Basel.)*, vol. 10, no. 8, pp. 1–22, 2017, doi: 10.3390/ma10080952.
- [78] B. Ayana, S. Suin, and B. B. Khatua, "Highly exfoliated eco-friendly thermoplastic starch (TPS)/poly (lactic acid)(PLA)/clay nanocomposites using unmodified nanoclay," *Carbohydr. Polym.*, vol. 110, pp. 430–439, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.04.024.
- [79] E. de M. Teixeira, A. A. S. Curvelo, A. C. Corrêa, J. M. Marconcini, G. M. Glenn, and L. H. C. Mattoso, "Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid)," *Ind. Crops Prod.*, vol. 37, no. 1, pp. 61–68, 2012, doi: 10.1016/j.indcrop.2011.11.036.
- [80] R. Al-Itry, K. Lamnawar, and A. Maazouz, "Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 97, no. 10, pp. 1898–1914, 2012, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.06.028.
- [81] Y. Deng, C. Yu, P. Wongwiwattana, and N. L. Thomas, "Optimising Ductility of Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene

- [103]N. Zhao et al., "Foaming poly(vinyl alcohol)/microfibrillated cellulose composites with CO₂ and water as co-blowing agents," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, no. 30, pp. 11962–11972, 2014, doi: 10.1021/ie502018v.
- [104]H. Storz and K. D. Vorlop, "Bio-based plastics: Status, challenges and trends," *Landbauforsch. Volkenrode*, vol. 63, no. 4, pp. 321–332, 2013, doi: 10.3220/LBF-2013-321-332.
- [105]H. Karan, C. Funk, M. Grabert, M. Oey, and B. Hankamer, "Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy," *Trends Plant Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 237–249, 2019, doi: 10.1016/j.tplants.2018.11.010.
- [106]S. Pathak, C. Sneha, and B. B. Mathew, "Bioplastics: Its Timeline Based Scenario & Challenges," *J. Polym. Biopolym. Phys. Chem.*, vol. 2, no. 4, pp. 84–90, 2014, doi: 10.12691/jpbpc-2-4-5.
- [107]S. O. Cinar, Z. K. Chong, M. A. Kucuker, N. Wiczorek, U. Cengiz, and K. Kuchta, "Bioplastic production from microalgae: A review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 11, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/ijerph17113842.
- [108]B. Yadav, A. Pandey, L. R. Kumar, and R. D. Tyagi, "Bioconversion of waste (water)/residues to bioplastics- A circular bioeconomy approach," *Bioresour. Technol.*, vol. 298, p. 122584, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122584.
- [109]S. Price, U. Kuzhiumparambil, M. Pernice, and P. J. Ralph, "Cyanobacterial polyhydroxybutyrate for sustainable bioplastic production: Critical review and perspectives," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 4, p. 104007, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.104007.
- [110]I. S. Sidek, S. F. S. Draman, S. R. S. Abdullah, and N. Anuar, "Current Development on Bioplastics and Its Future Prospects: an Introductory Review," *INWASCON Technol. Mag.*, vol. 1, pp. 03–08, 2019, doi: 10.26480/itechmag.01.2019.03.08.
- [111]L. Alaerts, M. Augustinus, and K. Van Acker, "Impact of bio-based plastics on current recycling of plastics," *Sustain.*, vol. 10, no. 5, 2018, doi: 10.3390/su10051487.
- [112]Liliani, B. Tjahjono, and D. Cao, "Advancing bioplastic packaging products through co-innovation: A conceptual framework for supplier-customer collaboration," *J. Clean. Prod.*, vol. 252, p. 119861, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119861.
- [95]C. Chiarathanakrit, J. Mayakun, A. Prathep, and K. Kaewtatip, "Comparison of the effects of calcified green macroalga (*Halimeda macroloba* Decaisne) and commercial CaCO₃ on the properties of composite starch foam trays," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 121, pp. 71–76, 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.09.191.
- [96]K. Kaewtatip, C. Chiarathanakrit, and S. A. Riyajan, "The effects of egg shell and shrimp shell on the properties of baked starch foam," *Powder Technol.*, vol. 335, no. 2017, pp. 354–359, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.05.030.
- [97]R. Sattar, A. Kausar, and M. Siddiq, "Advances in thermoplastic polyurethane composites reinforced with carbon nanotubes and carbon nanofibers: A review," *J. Plast. Film Sheeting*, vol. 31, no. 2, pp. 186–224, 2015, doi: 10.1177/8756087914535126.
- [98]R. Bhat, N. Abdullah, R. H. Din, and G. S. Tay, "Producing novel sago starch based food packaging films by incorporating lignin isolated from oil palm black liquor waste," *J. Food Eng.*, vol. 119, no. 4, pp. 707–713, 2013, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.06.043.
- [99]B. F. Bergel, L. M. da Luz, and R. M. C. Santana, "Comparative study of the influence of chitosan as coating of thermoplastic starch foam from potato, cassava and corn starch," *Prog. Org. Coatings*, vol. 106, pp. 27–32, 2017, doi: 10.1016/j.porgcoat.2017.02.010.
- [100]M. P. Motloung, V. Ojijo, J. Bandyopadhyay, and S. S. Ray, "Cellulose nanostructure-based biodegradable nanocomposite foams: A brief overview on the recent advancements and perspectives," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2019, doi: 10.3390/polym11081270.
- [101]J. Dlouhá, L. Suryanegara, and H. Yano, "The role of cellulose nanofibres in supercritical foaming of polylactic acid and their effect on the foam morphology," *Soft Matter*, vol. 8, no. 33, pp. 8704–8713, 2012, doi: 10.1039/c2sm25909e.
- [102]H. Y. Mi, X. Jing, J. Peng, M. R. Salick, X. F. Peng, and L. S. Turng, "Poly(ϵ -caprolactone) (PCL)/cellulose nano-crystal (CNC) nanocomposites and foams," *Cellulose*, vol. 21, no. 4, pp. 2727–2741, 2014, doi: 10.1007/s10570-014-0327-y.