

## From Waste to Advancement: A Comprehensive Review of Innovations in Tea Waste Utilization

**Zeinab Rostami**

\*Researcher, Genomics Department, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran. (Corresponding Author) z.rostami@abrii.an.ir

**Mehrana Koohi-Dehkordi**

Associate Professor, Secondary Metabolites Research Department, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

### Abstract

**Background and Objective:** As one of the most widely consumed beverages globally, tea generates a significant volume of waste, often disposed of without proper utilization. With increasing global tea production, managing this waste has become a critical environmental challenge. The aim of this study is to provide a comprehensive review of innovations in tea waste utilization and explore its value-added potentials in various fields.

**Materials and Methods:** This study was conducted as a narrative review, examining published research on tea waste, focusing on processing technologies, conversion methods, and novel applications. These applications include the production of biochar, biofuels, biogas, bioplastics, supercapacitors, aerogels, hydrogels, and composite nanomaterials.

**Results:** The findings indicate that tea waste has a high potential for producing value-added products of bioactive compounds, biosorbents, and receptive energy sources. Also, innovative applications in processing these wastes can play an effective role in reducing waste, improving resource management, and developing their applications in the plant, animal, and environmental sectors.

**Conclusion:** Comprehensive and sustainable use of tea wastes, in regulating the principles of circular economy and non-consumption environment, can be used as a solution for environmental reduction, economic efficiency, and a suitable replacement for conventional biomass resources. By providing an integrated perspective, this study can help develop scientific and industrial research and decision-making in the field of sustainable utilization of tea wastes.

**Keywords:** Biomass, Circular Economy, Tea Waste

**Open Access Policy:** This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Received:** 2025/05/31

**Accepted:** 2025/11/03

**Doi:**10.22038/jreh.2025.27551

► **Citation:** Rostami Z, Koohi-Dehkordi M. From Waste to Advancement: A Comprehensive Review of Innovations in Tea Waste Utilization. *Journal of Research in Environmental Health*. 11(4):121-144.

## از پسماند تا پیشرفت: بررسی جامع نوآوری‌ها در استفاده از ضایعات چای

### زینب رستمی

\* محقق بخش ژنومیکس، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان- ایران. (نویسنده مسئول)  
z.rostami@abrii.an.ir

### مهرآنا کوهی دهکردی

دانشیار، بخش تحقیقات متابولیت‌های ثانویه، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان- ایران.

### چکیده

**زمینه و زمینه و هدف:** چای به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین نوشیدنی‌های جهان، حجم قابل توجهی از ضایعات تولید می‌کند که اغلب بدون بهره‌برداری مناسب دفع می‌شوند. با افزایش تولید جهانی چای، مدیریت این ضایعات به یک چالش زیست‌محیطی مهم تبدیل شده است. هدف از این مطالعه، ارائه‌ی یک مرور جامع بر نوآوری‌ها در استفاده از ضایعات چای و بررسی پتانسیل‌های ارزش‌افزایی آن‌ها در حوزه‌های مختلف است.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه به‌صورت یک مقاله مروری نقلی انجام شد که در آن، پژوهش‌های منتشرشده در زمینه ضایعات چای با تمرکز بر فناوری‌های فرآوری، روش‌های تبدیل و کاربردهای نوین آن‌ها از جمله تولید بیوجار، تولید سوخت‌های زیستی، تولید بیوگاز و بیوپلاستیک، ابرخازن‌ها، آتروژل‌ها و هیدروژل‌ها و نانومواد کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج بررسی‌ها نشان داد که ضایعات چای دارای پتانسیل بالایی برای تولید محصولات با ارزش افزوده از جمله ترکیبات زیست‌فعال، جاذب‌های زیستی و منابع انرژی تجدیدپذیر هستند. هم‌چنین، به‌کارگیری رویکردهای نوآورانه در فرآوری این ضایعات می‌تواند نقش مؤثری در کاهش پسماند، بهبود مدیریت منابع و توسعه کاربردهای آن‌ها در بخش‌های گیاهی، حیوانی و زیست‌محیطی ایفا کند.

**نتیجه‌گیری:** استفاده جامع و پایدار از ضایعات چای در چارچوب اصول اقتصاد چرخشی و رویکرد «بدون زباله»، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی، افزایش بهره‌وری اقتصادی و جایگزینی مناسب برای منابع زیست‌توده متداول مطرح شود. این مطالعه با ارائه‌ی دیدگاهی یکپارچه، می‌تواند به توسعه تحقیقات آینده و تصمیم‌گیری‌های علمی و صنعتی در زمینه بهره‌برداری پایدار از ضایعات چای کمک کند.

**کلیدواژه‌ها:** زیست توده، اقتصاد چرخشی، ضایعات چای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

نوع مقاله: مروری

◀ **استناد:** رستمی ز، کوهی دهکردی م. از پسماند تا پیشرفت: بررسی جامع نوآوری‌ها در استفاده از ضایعات چای. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. زمستان ۱۴۰۴؛ ۱۱(۴): ۱۲۲-۱۴۴.

چای<sup>۱</sup> پس از آب، پرمصرف‌ترین نوشیدنی غیرالکلی در جهان است (۱). در طول دهه‌ی گذشته، تولید جهانی چای شاهد نرخ رشد سالانه ۳/۲ درصد بوده است و کل تولید در سال ۲۰۲۲ به ۶/۹ میلیون تن رسیده است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ به ۷/۴ میلیون تن برسد (۲). بر اساس داده‌های آماری استاتیستا<sup>۲</sup> (۲۰۲۲)، تولید جهانی چای تقریباً ۶/۶۸ میلیون تن است که مصرف ظاهری آن در سراسر جهان ۵,۸۲ میلیون تن است. کشورهای چین، هند، سریلانکا و کنیا از مهم‌ترین تولیدکنندگان چای در سطح جهان به‌شمار می‌روند. از انواع مختلف چای تولید شده در سراسر جهان، سبز، سیاه، اولانگ، زرد، سفید و تیره، ۷۸٪ آن را چای سیاه تشکیل می‌دهد (۳-۴). چای به‌دلیل برخورداری از فواید متعدد برای سلامت انسان، از جمله خواص ضدباکتری و آنتی‌اکسیدانی، محافظت از قلب، پیشگیری از سرطان، ضد دیابت، کاهش وزن و محافظت از سیستم عصبی، در سراسر جهان رواج دارد. چای حاوی ترکیبات زیست‌فعال متنوعی است که شامل کاتچین‌ها، فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، اسیدهای آمینه آزاد و رنگ‌های چای می‌شود. این ترکیبات، به‌ویژه مواد فنلی، نقش مهمی در خواص ویژگی‌های چای ایفا می‌کنند (۵-۱۰)، همان‌طور که شانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ گزارش کرده‌اند با افزایش چشمگیر مصرف جهانی چای، تولید ضایعات کشاورزی مرتبط با چای<sup>۳</sup> نیز به موازات آن افزایش یافته است. این روند، چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه دارد، به‌ویژه در کشورهایی که تولید چای بالایی دارند. به‌عنوان مثال، در هند، طبق یک مطالعه، سالانه حدود ۸۵۷/۰۰۰ تن چای تولید می‌شود که در پی آن تقریباً ۱۹۰/۴۰۰ تن ضایعات چای کارخانه‌ای<sup>۴</sup> (FTW) به وجود می‌آید (۱۱). رهاسازی بقایای چای بدون تصفیه کافی در محیط‌های آبی به‌دلیل داشتن غلظت بالای تانن‌ها و پلی‌فنول‌ها می‌تواند بسیار مضر باشند، چنین ترکیباتی با ماهیت اسیدی خود، می‌تواند بر برهم زدن تعادل pH خاک و آب بر تنوع زیستی و اکوسیستم‌های

محلی تأثیر منفی گذارد. به‌ویژه تانن موجود در ضایعات چای می‌تواند سطح اکسیژن محلول در آب را کاهش دهد که برای حیات آبریان خطرناک است. علاوه بر این، اجزای آلی موجود در ضایعات چای ممکن است از طریق جذب آفات، تولید بوهای نامطبوع و انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند متان در طول فرآیند تجزیه در محل‌های دفن زباله، به تغییرات اقلیمی کمک کنند. هم‌چنین، روش‌های نامناسب کمپوست‌سازی یا مدیریت ناکافی این بقایا می‌تواند به‌طور قابل توجهی کیفیت خاک را در مناطق کشاورزی کاهش داده و حاصل‌خیزی آن را تحت تأثیر قرار دهد. علی‌رغم پتانسیل موجود در چای به‌عنوان یک منبع قابل بازیافت، فقدان شیوه‌های سیستماتیک در استفاده مجدد و بازیافت برای ضایعات چای اغلب منجر به تخریب قابل توجهی در محیط زیست می‌شود و بر اکوسیستم‌های زمینی و آبی تأثیر منفی می‌گذارد (۱۳-۱۲). طی دهه‌های اخیر، تحقیقات پیرامون چای و فرآورده‌های جانبی آن به‌طور عمده بر شناسایی و تحلیل ترکیبات زیست‌فعال موجود در انواع مختلف چای متمرکز بوده است. با این حال، هم‌چنان یک شکاف قابل توجه در مطالعات مربوط به بهره‌برداری جامع از زیست‌توده ضایعات چای وجود دارد. به‌طور خاص، تلاش‌های علمی محدودی به بررسی استخراج پلی‌فنول‌ها از ضایعات کارخانه‌ای چای اختصاص یافته است، با وجود این‌که ضایعات چای پتانسیل بازیابی بالایی برای پلی‌فنول‌ها نشان داده‌اند. برخی مطالعات به تحلیل خواص آنتی‌اکسیدانی ضایعات چای خانگی و برگ‌های چای مصرف‌شده پرداخته‌اند (۱۵-۱۴). هم‌چنین، مقایسه‌هایی بین فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی برگ‌های چای کهنه و برگ‌های چای سبز با ضایعات چای سیاه، به‌همراه راندمان استخراج آن‌ها، انجام شده است. این تحقیقات نشان می‌دهند که ضایعات چای نیز دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی هستند و می‌توانند منبع با ارزشی برای ترکیبات فعال زیستی باشند. روش‌های مختلفی مانند استخراج با آب داغ، استخراج با کمک مایکروویو، استخراج با کمک فراصوت و روش انفجار بخار توسط محققان برای افزایش قابلیت استخراج و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی ترکیبات زیست‌فعال از انواع مختلف چای استفاده شده است (۱۵-۱۴). محتوای فنلی

<sup>1</sup> Camellia Sinensis

<sup>2</sup> Statista

<sup>3</sup> Tea waste (TW)

<sup>4</sup> Factory Tea Waste

اقتصاد احیاکننده، مسیرهای جدیدی برای بهره‌برداری بهینه از ضایعات چای ترسیم می‌نمایند.

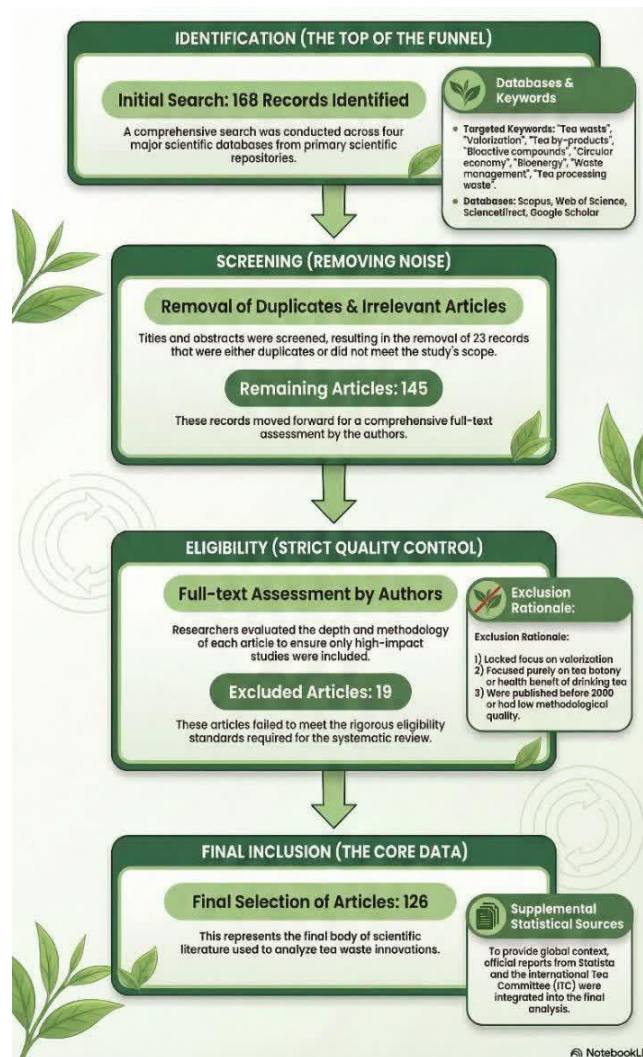
## روش کار

در این مقاله مروری، در مرحله جستجوی اولیه در پایگاه‌های داده Scopus، Web of Science و Science Direct، مجموعاً ۱۶۸ مقاله شناسایی گردید. پس از بررسی عناوین و چکیده‌ها و حذف مقالات تکراری و مطالعات نامربوط، تعداد ۱۴۵ مقاله با استفاده از کلیدواژه‌های شکل ۱ جهت بررسی دقیق‌تر باقی ماند. در نهایت، با ارزیابی کیفیت علمی و میزان ارتباط با محورهای اصلی تحقیق، از جمله کاربردهای محیط‌زیستی، تولید انرژی و اقتصاد چرخشی، ۱۲۶ مقاله که دارای بیشترین قرابت با اهداف مطالعه بودند، برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. همچنین از گزارش‌ها و مستندات رسمی سازمان‌های بین‌المللی به‌عنوان منابع تکمیلی استفاده شد.

دلایل حذف:

- مرحله اول (حذف تکراری‌ها): مقالات مشترک میان پایگاه‌های مختلف شناسایی و حذف شدند.
- مرحله دوم (عدم ارتباط موضوعی): مقالات مروری که صرفاً به فواید درمانی نوشیدن چای پرداخته بودند و جنبه‌های مدیریت ضایعات و بازیافت (Valorization) را شامل نمی‌شدند، از مطالعه خارج شدند.
- مرحله سوم (کیفیت علمی و زبان): مطالعاتی که در مجلات با اعتبار علمی پایین منتشر شده بودند یا متن کامل آن‌ها به زبان انگلیسی یا فارسی در دسترس نبود، حذف گردیدند.
- مرحله چهارم (تمرکز بر نوآوری): مقالات قدیمی که روش‌های سنتی و غیرکاربردی را بررسی کرده بودند و با رویکرد اقتصاد چرخشی و فناوری‌های نوین (مانند نانومواد و ابرخازن‌ها) هم‌خوانی نداشتند، جایگزین منابع به‌روزتر (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵) شدند.

کل (TPC) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی حاصل از ضایعات فرآوری قهوه و چای سیاه مصرف‌شده نیز برای استفاده‌های بعدی ارزیابی شدند (۱۶-۱۸). به‌طور مشابه، فیبر به‌دست‌آمده از ضایعات چای سبز برای سنجش محتوای فنولی و ارزیابی ویژگی‌های کاهندگی آن به کار گرفته شد تا امکان مقایسه این خصوصیات با عصاره‌های گیاهی مختلف فراهم شود (۱۹). بنابراین، تبدیل ضایعات کشاورزی به یک ماده خام با ارزش اقتصادی بالا، بخش مهمی از تحقیقات چای را تشکیل می‌دهد (۲۰). روند رو به رشد تمرکز بر ترکیبات فعال و ارزشمند موجود در چای، هم‌چون پلی‌فنول‌ها، پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها، نتیجه افزایش تقاضا برای استخراج، مطالعه و تولید صنعتی این مواد است. در این راستا، بهره‌برداری کارآمد و مدیریت اصولی ضایعات کشاورزی؛ از جمله ضایعات حاصل از فرآوری چای می‌تواند این پسماندها را به مواد اولیه‌ای با ارزش افزوده بالا تبدیل کند. با پیشرفت سریع علوم و فناوری‌های نوین صنایع غذایی، تلاش بیشتری برای شناسایی راهکارهای کاربردی جهت استفاده مؤثر از این منابع و افزایش ارزش اقتصادی در کل زنجیره تولید و فرآوری چای صورت گرفته است. هدف از این مطالعه، بررسی جامع جنبه‌های گوناگون مرتبط با ضایعات چای، از جمله میزان تولید جهانی، ترکیبات شیمیایی و رویکردهای مختلف مدیریت این پسماند است. در این چارچوب، ارزیابی دقیقی از امکان تولید طیف متنوعی از محصولات با ارزش افزوده از ضایعات چای ارائه شده و روش‌های نوآورانه استخراج و فرآوری محصولات جانبی ارزشمند از طریق فناوری‌های مختلف مورد بحث قرار گرفته است. افزون بر این، چالش‌ها و چشم‌اندازهای پیش‌روی کاربردهای نوین ضایعات چای در صنایع گوناگون، به‌ویژه در حوزه‌های تولید انرژی و اصلاح محیط‌زیست، به‌صورت تفصیلی بررسی شده‌اند. یافته‌های این مطالعه مروری نقش مهمی در حمایت از رشد پایدار و توسعه سازگار با محیط‌زیست ایفا می‌کنند و با تأکید بر مدیریت منابع در چارچوب اصول «بدون پسماند» و



شکل ۱. شماتیک غربالگری مقالات و مستندات

## یافته‌ها

### وضعیت فعلی ضایعات چای در اقتصاد چرخشی و اهمیت آن

چای در سال ۲۰۱۹ به ۶/۱ میلیون تن رسیده است. طبق برآوردهای جمعیتی، در سال ۲۰۲۲، ۲۵,۰۰ دلار درآمد به‌ازای هر نفر ایجاد شده است. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۵، مصرف چای در خارج از خانه، به‌ویژه در بازارها، رستوران‌ها، بارها و سفرها، ۱۱ درصد از هزینه‌های صرف شده و ۶۶ درصد از حجم را به خود اختصاص دهد (۲۲). پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که تولید جهانی چای سبز با نرخ سالانه ۷/۵ درصد روبرو است و تا سال ۲۰۲۷، این رشد می‌تواند منجر به حجم کل تولید تقریباً ۳/۶ میلیون تن شود. این رشد قابل توجه در تولید چای سبز، بازتاب‌دهنده افزایش تقاضای جهانی برای این محصول است که ناشی از آگاهی فزاینده درباره فواید سلامتی آن و هم‌چنین محبوبیت روزافزونش در بازارهای

در رویکرد اقتصاد چرخشی، ارزش‌افزایی محصولات جانبی غذایی فرصتی را فراهم می‌کند تا از آن‌ها به‌عنوان منابع بالقوه ترکیبات زیست‌فعال، به‌ویژه پلی‌فنول‌های آنتی‌اکسیدانی، در تولید مواد تشکیل‌دهنده عملکردی برای صنایع غذایی استفاده شود (۲۱). در واقع، مفهوم اقتصاد چرخشی در رابطه با محصول چای، یک استراتژی پایدار است که زباله‌های چای را به محصولی ارزشمند تبدیل می‌کند (۱۲). کمیته بین‌المللی چای<sup>۱</sup> در بولتن داده‌های سالانه ۲۰۲۰ خود گزارش داد که تولید جهانی

<sup>1</sup> The International Tea Committee (ITC)

مختلف است. چین نقش کلیدی در این توسعه ایفا خواهد کرد و پیش‌بینی می‌شود تولید چای سبز این کشور از ۱/۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۷ به ۳/۶ میلیون تن تا سال ۲۰۲۷ افزایش یابد. در حال حاضر، چین با حدود ۴۰ درصد و هند با تقریباً ۲۳ درصد، بخش‌های عمده‌ای از تولید جهانی چای را به خود اختصاص داده‌اند (۱۲). ضایعات چای از ظرفیت‌های قابل توجهی برای ایجاد ارزش اقتصادی برخوردار هستند و بازیابی و بازیافت هدفمند آن‌ها نقش مهمی در شکل‌گیری و توسعه اقتصاد زیستی ایفا می‌کند. در این راستا، رویکرد اقتصاد زیستی چرخشی مزایای متعددی از جمله ارتقای آگاهی عمومی و تجاری، افزایش مشارکت ذی‌نفعان و سیاست‌گذاران، جذب حمایت‌های مالی، توسعه‌ی تولید سازگار با محیط‌زیست، ارزیابی بهینه دارایی‌ها و حرکت به سوی راهبردهای بدون پسماند را فراهم می‌سازد. در سالین اخیر، همکاری‌های گسترده‌ای میان دولت‌ها، دانشمندان و پژوهشگران برای بازیابی منابع باارزش از ضایعات چای آغاز شده است (۲۸-۲۳). این ضایعات حاوی ترکیبات مفیدی مانند پلی‌فنول‌ها و کافئین هستند که عمدتاً خواص آنتی‌اکسیدانی دارند (۲۶-۲۴). استخراج این ترکیبات نه تنها به کاهش حجم زباله کمک می‌کند، بلکه منجر به تولید مواد با ارزش افزوده‌ای می‌شود که می‌توانند در بهبود سلامت انسان و پایداری محیط زیست نقش مؤثری ایفا کنند. به‌عنوان مثال، تحلیل کافئین و کاتچین موجود در ضایعات چای سیاه، راهکارهای فنی-اقتصادی را برای توسعه جاذب‌های مقرون‌به‌صرفه جهت حذف فلزات سنگین مانند مس و سرب از فاضلاب فراهم می‌آورد (۲۹). این رویکردها می‌توانند منابع درآمدی جدیدی برای کشاورزان ایجاد کرده و هم‌زمان با بهبود کیفیت خاک و حفاظت از محصولات، به پیشبرد اصول اقتصاد چرخشی کمک کنند (۳۰). در نتیجه، این فعالیت‌ها نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی ایفا خواهند کرد. علاوه بر این، توسعه زیرساخت‌های لازم برای استخراج و فرآوری ترکیبات شیمیایی با ارزش افزوده بالا از ضایعات چای، فرصت‌های شغلی جدیدی ایجاد کرده و از رشد اقتصادی حمایت می‌کند. از سوی دیگر، استفاده از ضایعات چای به‌عنوان منبع تولید انرژی نیز مطرح شده است که می‌تواند مزایای اقتصادی این پسماندها را در چارچوب اقتصاد چرخشی

بیش از پیش گسترش دهد. به‌طور کلی، ضایعات چای نمونه‌ای بارز از قابلیت‌های اقتصاد چرخشی در تحول صنعت کشاورزی-غذایی به‌شمار می‌روند (۳۱-۳۲). چنین پیشرفت‌هایی می‌تواند به‌طور قابل توجهی کارایی استفاده از محصولات جانبی چای و در نتیجه ارزش اقتصادی آن را افزایش دهد.

### ضایعات چای: انواع، ویژگی‌ها و ترکیبات

فرآیند تولید و مصرف چای در مراحل مختلفی از جمله پژمردگی، تخمیر، برداشت برگ، خشک‌کردن، دم‌آوری و بسته‌بندی، منجر به تولید انواع مختلفی از ضایعات می‌شود. این پسماندها را می‌توان در گروه‌های ضایعات چای، ضایعات صنعتی، ضایعات حاصل از فرآوری و ضایعات هرس طبقه‌بندی کرد. گزارش‌ها نشان می‌دهد که حدود ۹۰ درصد از باقی‌مانده‌های ضایعات چای پس از استخراج با بخار یا آب داغ، در محیط‌های مصرفی مانند منازل، رستوران‌ها و هتل‌ها تولید می‌شوند (۳۳). در این میان، بخش عمده‌ای از ضایعات چای<sup>۱</sup> ناشی از مصرف روزانه افراد و باقی‌مانده برگ‌های چای دم‌کشیده است. علاوه بر این، در طی فرآیند پالایش و فرآوری چای، به‌منظور ارتقای کیفیت محصول نهایی، بخشی از برگ‌های اضافی و سایر اجزای گیاهی حذف می‌شوند که مجموع آن‌ها به‌عنوان ضایعات فرآوری چای شناخته می‌شود. این ضایعات حاصل از صنایع چای حاوی مقادیر قابل توجهی از ترکیبات فنلی زیست‌فعال هستند و از این‌رو فرصت‌های ارزشمندی را برای بازیافت و کاربرد در صنایع داروسازی و زیست‌پزشکی فراهم می‌کنند. ضایعات فرآوری چای علاوه بر ترکیبات فنلی، حاوی کافئین نیز هستند که آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای استخراج هم‌زمان این دو نوع ترکیب تبدیل می‌کند (۳۴). علاوه بر این، تحقیقات کنونی بر توسعه و فرمولاسیون محصولات کشاورزی و شیمیایی، توجه ویژه‌ای به بقایای گیاهی و ساقه‌های حاصل از فرآوری چای نشان داده‌اند. این بقایا عمدتاً از بوته‌های چای متداول در تولید تجاری به دست می‌آیند، جایی که هرس سالانه نقش کلیدی در مدیریت باغات چای ایفا می‌کند. بقایای حاصل از هرس، شامل برگ‌ها، جوانه‌ها و شاخه‌ها، سرشار از مواد مغذی ضروری، پروتئین‌ها و ترکیبات ثانویه گیاهی مانند ساپونین‌ها و تانن‌ها هستند

<sup>1</sup> Tea waste

پسماندها فراهم آورد (۳۷).

## بحث

### روش‌های موثر در مدیریت ضایعات چای

#### صادرات ضایعات چای

صادرات ضایعات چای می‌تواند این پسماندها را از یک محصول جانبی کم‌ارزش به منبعی سودآور و ارزش‌افزا تبدیل کند. ضایعات چای قابلیت استفاده در حوزه‌هایی نظیر تولید بسته‌بندی‌های قابل بازیافت، استخراج ترکیبات زیست‌فعال برای کاربردهای دارویی و همچنین صادرات برگ‌های خشک‌شده چای برای مصارف آرایشی-بهداشتی یا صنایع غذایی را دارند (۳۸). در این راستا، مناطق تولیدکننده چای از ظرفیت قابل توجهی برای ورود به بازارهای جهانی و بهره‌مندی از تقاضای روبه‌رشد برای محصولات طبیعی و سازگار با محیط‌زیست برخوردارند. این رویکرد نه تنها فرصت‌های جدیدی را برای دسترسی به بازارهای بین‌المللی فراهم می‌کند، بلکه امکان معرفی و عرضه محصولات زیست‌پایه و پایدار را به مصرف‌کنندگان جهانی مهیا می‌سازد (۱۲، ۳۹، ۴۰). شواهد اقتصادی نشان می‌دهد که در برخی مناطق هند، ضایعات صنعتی چای می‌توانند با حاشیه سودی در حدود ۳۰ تا ۴۵ روپیه به‌ازای هر کیلوگرم به فروش برسند. این رویکرد پایدار با اصول حفاظت از محیط‌زیست هم‌راستا بوده و ظرفیت بالای تبدیل ضایعات چای به دارایی‌های ارزشمند در صنعت چای را برجسته می‌کند (۲۳، ۴۱).

#### کاربرد در صنایع غذایی و خوراک دام

پسماندهای کشاورزی، از جمله تفاله چای، راهبردهای نوآورانه‌ای برای توسعه‌ی خوراک‌های سالم، کم‌چرب و دوستدار محیط‌زیست ارائه می‌دهند. تفاله‌ی چای سرشار از پروتئین‌ها، مواد معدنی و متابولیت‌های ثانویه گیاهی، از جمله تانن‌ها و ساپونین‌ها است که برای جیره‌ی حیوانات سودمند هستند (۲۵). تفاله‌ی چای از سه مسیر اصلی در خوراک حیوانات به‌کار گرفته می‌شود: مسیر نخست شامل افزودن مستقیم آن به جیره غذایی است. مسیر دوم، استخراج سلولز، پروتئین، پلی‌ساکاریدهای چای و سایر ترکیبات فعال از تفاله چای و وارد کردن آن‌ها به خوراک است. روش سوم، استفاده از تفاله‌ی چای به‌عنوان بستر و ماده کمکی از طریق تخمیر میکروبی

که پتانسیل بالایی برای کاربردهای مختلف دارند. این مواد می‌توانند به‌عنوان منابع ارزشمند در صنایع گوناگون مورد استفاده قرار گیرند. در بخش تجاری نیز، طی فرآیند تولید نوشیدنی‌های چای بطری‌شده، چای فوری و نوشیدنی‌های کنسرو شده، مقادیر قابل توجهی ضایعات فیبری تولید می‌شود، به‌ویژه در مراحلی که برگ‌های خام چای در معرض بخار یا آب داغ قرار می‌گیرند (۳۵). این ضایعات نیز می‌توانند به‌عنوان منابعی با ارزش افزوده برای بازیافت و استفاده مجدد مورد بررسی قرار گیرند. به‌طور تقریبی صد گرم برگ چای تازه حاوی فیبر خام (۲۷٪)، لیگنین (۵-۶٪)، پروتئین‌ها (۱۴-۱۷٪)، پلی فنول‌ها (۲۲٪)، پکتین (۵-۶٪)، خاکستر (۵-۶٪)، لیپیدها (۳-۷٪)، سلولز و همی‌سلولز (۴-۷٪) و سایر مواد آلی است. علاوه بر این، پروتئین‌های خام نیز در دیواره‌های سلولی برگ‌های چای وجود دارند که به مشخصات تغذیه‌ای و ترکیب کلی آن‌ها کمک می‌کنند. در نتیجه، ضایعات باقی مانده پس از جوشاندن چای فرآوری شده در خانه حاوی طیف وسیعی از مواد مهم، مانند ترکیبات فعال بیولوژیکی مانند ۳۰ تا ۴۰ درصد پلی فنول‌ها، عمدتاً پلی ساکاریدها، ۶۸/۲ درصد همی سلولز، ۱۶/۲ درصد سلولز، ۱۸/۸ تا ۷۶/۱۱ درصد لیگنین، ۶/۳ درصد تانن و ۱۵ تا ۳۰ درصد پروتئین است (۷). بقایای چای سبز و سیاه، علی‌رغم دارا بودن مقادیر محدودی از درشت‌مغذی‌ها، از ظرفیت‌های قابل توجهی در ارتقای سلامت برخوردار است. این مواد سرشار از آنتی‌اکسیدان‌هایی نظیر کاتچین‌ها و تئافلاوین‌ها هستند که با مهار رادیکال‌های آزاد، می‌توانند در کاهش خطر بروز بیماری‌های مزمن و فرآیندهای التهابی نقش مؤثری ایفا کنند. افزون بر این، بقایای چای حاوی ریزمغذی‌ها و عناصر معدنی ضروری مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم هستند که در حفظ استحکام استخوان‌ها و تعادل مایعات بدن اهمیت دارند. همچنین، تفاله چای به‌عنوان یک جاذب طبیعی، پتانسیل کاربرد در فرآیندهای تصفیه آب را دارد و می‌تواند به مدیریت پایدار پسماندها کمک کند. با وجود این قابلیت‌ها، روش‌های رایج دفع این حجم قابل توجه از ضایعات چای عمدتاً شامل سوزاندن یا دفن آن‌ها است که پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی به‌همراه دارد (۱۲، ۳۶). در مقابل، توسعه و اجرای برنامه‌های هوشمند و نوآورانه می‌تواند مسیرهای ارزش‌آفرین و پایدار برای بهره‌برداری مؤثر از این

آسپارات آمینوترانسفراز شد (۵۰). علاوه بر روش‌های فرآوری فیزیکی، روش‌های تخمیر تفاله چای نیز در خوراک دام قابل استفاده هستند. افزودن تفاله چای تخمیرشده به خوراک گاو پرواری می‌تواند به‌طور مؤثر نرخ تنفس و دمای مقعدی گاوهای تحت تنش گرمایی را کاهش دهد، متعاقباً مصرف روزانه خوراک افزایش و در نتیجه موجب افزایش وزن روزانه و محتوای آنتی‌اکسیدانی و بهبود شاخص ایمنی خون شود (۵۱). در پاسخ به پژوهش‌های یادشده، ترکیب غنی تفاله چای می‌تواند برای توسعه فناوری‌های تخمیر هدفمند در تولید افزودنی‌های خوراکی با ارزش بالا به کار گرفته شود. این هدف از طریق انتخاب جوامع میکروبی خاص و کنترل دقیق پارامترهای تخمیر قابل دستیابی است. با این حال، انجام مطالعات جامع برای ارزیابی اثرات بلندمدت استفاده از تفاله چای به‌عنوان جایگزین مواد خوراکی ضروری است. این مطالعات باید شامل ارزیابی اثرات بر سلامت حیوان، عملکرد تولیدی و کیفیت محصولات دامی باشند.

#### کاربرد در کشاورزی و بهبود خاک

اسیدیته خاک یک عامل کلیدی است که بر کشت چای تأثیر می‌گذارد. نیتروژن آلی می‌تواند باعث اسیدی شدن خاک شود و حتی بدون افزودن نیتروژن از خارج، این فرآیند به‌طور طبیعی نیز رخ می‌دهد (۵۲). اگرچه گیاه چای به‌طور معمول در خاک‌های اسیدی به‌خوبی رشد می‌کند، اسیدی شدن بیش از حد خاک می‌تواند به عملکرد و کیفیت محصول آسیب برساند. هنگامی که pH خاک به کمتر از ۴/۰ کاهش می‌یابد، رشد گیاه چای دچار اختلال می‌شود و این موضوع مستقیماً بر عملکرد و کیفیت برگ‌های چای تأثیر می‌گذارد (۵۳). با افزایش مساحت مزارع چای، مدیریت اسیدیته خاک به یک چالش جدی‌تر تبدیل شده است. با این حال، تفاله چای و مشتقات آن راهکارهای موثری برای بهبود سلامت خاک‌های چای‌کاری و کاهش اسیدی شدن خاک ارائه داده‌اند. برای مثال، به‌جای استفاده مستقیم از تفاله چای به‌عنوان کود، بقایای هرس چای اغلب به‌عنوان مالچ با خاک مخلوط می‌شوند. این روش به بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب کمک می‌کند (۵۴)، که در نهایت به حفظ تعادل pH خاک و ارتقای رشد سالم گیاه چای منجر می‌شود. ویژگی‌های قلیایی، pH بالا و ظرفیت بافری تفاله چای، اسیدیته را به‌طور مؤثر خنثی

است. تفاله چای دارای دو ترکیب پلی‌فنولی اصلی، یعنی کاتچین‌ها و تئافلایین‌ها، همراه با مقدار قابل توجهی آلکالوئید، عمدتاً کافئین، است (۱۷). وجود تانن‌ها به اتصال و محافظت از پروتئین‌های خوراک در جیره نشخوارکنندگان کمک می‌کند و با افزایش پروتئین عبوری و تأمین نیتروژن غیرآمونیاکی، باعث بهبود جذب تفاله چای در روده باریک می‌شود (۴۲). از سوی دیگر پس از حذف کافئین، می‌توان از ضایعات چای بدون کافئین به‌عنوان خوراک طیور استفاده کرد (۴۳). با این حال، ضایعات حاوی بیش از ۵٪ اسیدتانیک می‌تواند به‌عنوان یک عامل ضد تغذیه‌ای به رشد و عملکرد جوجه‌های گوشتی آسیب برساند (۳۰، ۴۴). افزودن ضایعات چای به رژیم غذایی بز با جایگزینی تا ۱۰٪ از منبع پروتئین، تغییر قابل توجهی در مصرف غذا، پروفایل خون یا انتشار متان ایجاد نکرد (۴۵). علاوه بر این، این رژیم غذایی سیستم ایمنی خوک‌های در حال رشد را بهبود بخشید و تولید تخم‌مرغ را در مرغ‌ها افزایش داد. استفاده از ضایعات چای در خوراک ماهی، شیوه‌های پایدار آبی‌پروری را ترویج می‌دهد و ممکن است عملکرد رشد حیوانات را بهبود بخشد. این رویکرد با اصول اقتصاد چرخشی همسو است و یک راه‌حل زیست‌محیطی و مالی مقرون به‌صرفه برای محصولات جانبی کشاورزی ارائه می‌دهد. این موضوع می‌تواند سلامت، رشد و رفاه عمومی ماهی را افزایش دهد و منجر به تولید پایدارتر و مؤثرتر محصولات و خوراک‌های ماهی سازگار با محیط زیست شود (۴۶، ۴۷). در پژوهشی تیمار حرارتی، غلظت تانن کل و تانن متراکم تفاله چای را کاهش داد و قابلیت تجزیه‌پذیری مؤثر در شکمبه و قابلیت هضم پروتئین روده‌ای را بهبود بخشید (۴۸). در نتیجه، تفاله چای خشک‌شده به‌عنوان جایگزینی مناسب برای برخی مواد خوراکی مطرح می‌شود. علاوه بر این، زمانی که از جیره‌های حاوی تفاله چای خشک استفاده شود، بازده تبدیل نیتروژن جیره به پروتئین بدن در حیواناتی با میزان چربی بالاتر افزایش می‌یابد (۴۹). افزودن پودر ضایعات چای سبز به جیره طیور گوشتی موجب کاهش چشمگیر چربی شکمی و برخی متابولیت‌های چربی، از جمله کلسترول، کلسترول بد، تری‌گلیسیرید و

<sup>1</sup> Low-density lipoprotein (LDL)

می‌کنند (۵۸). علاوه بر این، سطح ویژه‌ی بالا و فراوانی گروه‌های عاملی سطحی در ضایعات چای، ظرفیت جذب آن‌ها را افزایش داده و هم‌زمان از اتلاف عناصر غذایی در طی فرآیند کمپوست‌سازی جلوگیری می‌کند (۵۹). تولید کمپوست توسط کرم‌ها به‌عنوان یک روش زیستی کم‌هزینه و کارآمد، امکان بازیافت پسماندهای آلی جامد را در محیطی مناسب برای فعالیت کرم‌های خاکی و میکروارگانسیم‌ها فراهم می‌سازد (۲۷). این روش با تبدیل مؤثر زباله‌های آلی به کود، پتانسیل قابل توجهی برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی دارد (۶۰). به‌طور کلی، کمپوست‌سازی به‌دلیل تأثیر مثبت بر کیفیت محصول نهایی، به‌ویژه در تسریع تجزیه‌ی مواد آلی متنوع، مورد توجه گسترده قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهند که کمپوست‌سازی هم‌زمان برخی پسماندها با کود دامی، مانند کود خوک، می‌تواند به کاهش قابل توجهی در ژن‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک (Antibiotic Resistant Genes) در محصول نهایی کمپوست منجر شود. این یافته‌ها، اهمیت انتخاب دقیق مواد اولیه در فرآیند کمپوست‌سازی را برجسته می‌کنند. این کاهش در ARGs عمدتاً به دو دلیل کلیدی اتفاق می‌افتد: اولاً، جمعیت میکروارگانسیم‌هایی که به‌طور بالقوه میزبان این ژن‌ها هستند، در طول فرآیند کمپوست‌سازی هم‌زمان کاهش می‌یابد. دوماً، انتقال افقی ژن‌ها، که یک مکانیسم اصلی برای انتشار مقاومت آنتی‌بیوتیکی است، بین ژن‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک و ژن‌های مقاوم به فلزات نیز مهار می‌شود. بنابراین، کمپوست‌سازی مشترک نه‌تنها به مدیریت پسماند کمک می‌کند، بلکه راهکاری مؤثر برای کاهش خطر گسترش مقاومت آنتی‌بیوتیکی در محیط زیست، مطابق با تحقیقات پنگ و همکاران (۲۰۲۰)، ارائه می‌دهد. در چشم‌انداز پژوهش‌های آینده، بهره‌گیری هدفمند از ویژگی‌های تخلخل بالا و چگالی پایین ضایعات چای می‌تواند زمینه‌ساز توسعه سیستم‌های کمپوست‌سازی هوشمند و کنترل‌شده باشد. این سیستم‌ها با استفاده از حسگرهای پیشرفته، امکان پایش و تنظیم پیوسته پارامترهای کلیدی نظیر دما، رطوبت و غلظت گازها را در زمان واقعی فراهم کرده و از این طریق، فعالیت میکروبی و کارایی فرآیند تجزیه را بهینه می‌کنند. رویکردهای نوین در مهندسی ژنتیک و زیست‌شناسی مصنوعی، با طراحی و به‌کارگیری جوامع میکروبی

کرده و ویژگی‌های خاک را بهبود می‌بخشند (۵۵). این تغییرات نه‌تنها بر کارآمدی عناصر غذایی خاک تأثیر مثبت می‌گذارند، بلکه موجودات زنده‌ی خاک را نیز غنی‌تر می‌کند و در نهایت موجب افزایش عملکرد و کیفیت برگ‌های چای می‌شوند (۵۳). ماهیت کمی قلیایی تفاله چای، فرصتی برای توسعه اصلاح‌کننده‌های نوین خاک فراهم می‌کند که می‌توانند خاک‌های اسیدی را خنثی کنند. این اصلاح‌کننده‌ها نه‌تنها محتوای ماده آلی خاک را افزایش می‌دهند، بلکه ساختار خاک و ظرفیت نگهداشت آب را نیز بهبود می‌بخشند. به‌منظور بهره‌برداری کامل از پتانسیل مشتقات تفاله چای، ضروری است که کارایی آن‌ها در انواع خاک‌های اسیدی و هم‌چنین در سیستم‌های کشاورزی متفاوت مورد بررسی دقیق قرار گیرد. چنین مطالعاتی می‌تواند دانش ارزشمندی را در اختیار قرار دهد تا بتوان با استفاده هوشمندانه از مشتقات تفاله چای، سلامت و حاصل‌خیزی خاک را به نحو احسن ارتقا بخشید.

### کاربرد در کمپوست‌سازی

کمپوست‌سازی به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال رایج‌ترین روش‌های تبدیل زیست‌توده به کود آلی شناخته می‌شود (۵۶). محبوبیت کمپوست‌سازی رو به افزایش بوده است و ضایعات چای به‌عنوان یک کود ارزشمند عمل می‌کند (۵۷). در روش‌های سنتی کمپوست‌سازی، تمرکز اصلی بر استفاده از مواد خام طبیعی مانند بقایای برگ‌ها و ضایعات چوبی بوده است. محصولات به‌دست آمده از این فرآیندها اغلب سرشار از ترکیبات آلی ماکرومولکولی هستند که عمدتاً شامل مواد لیگنوسلولوزی می‌شوند. این ترکیبات لیگنوسلولوزی به‌دلیل ساختار مقاوم خود در برابر تجزیه‌ی میکروبی، باعث کندی نسبی فرآیند کمپوست‌سازی می‌شوند. این ویژگی به‌معنای زمان‌بر بودن تبدیل این مواد به کمپوست نهایی است، همان‌طور که توسط وانگ و همکاران (۲۰۲۳) نیز تأکید شده است. ضایعات چای به‌دلیل دارا بودن تخلخل بالا و چگالی ظاهری پایین، ویژگی‌های فیزیکی مطلوبی برای فرآیند کمپوست‌سازی ارائه می‌دهند. این خصوصیات نه‌تنها موجب بهبود نفوذپذیری هوا و ظرفیت نگهداشت آب در توده‌ی کمپوست می‌شوند، بلکه با تسریع توالی و پویایی جوامع میکروبی، فرآیند تجزیه‌ی مواد آلی را نیز تقویت

تخصصی، می‌توانند به شکل قابل توجهی سرعت تجزیه مواد آلی را افزایش دهند. این پیشرفت‌ها، کارایی کلی مدیریت ضایعات چای را بهبود بخشیده و به تولید کمپوست با کیفیت‌تر کمک می‌کنند. کیفیت نهایی کمپوست تولید شده از ضایعات چای به عوامل متعددی از جمله غلظت، میزان بلوغ و ترکیب شیمیایی اولیه این ضایعات بستگی دارد. کمپوست حاصل از چای، به دلیل افزایش چشمگیر جمعیت باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و غنای مواد مغذی، دارای خواص منحصربه‌فردی است. همان‌گونه که توسط زاگاردلی و همکاران (۲۰۱۸) و سحر و همکاران (۲۰۱۸) تأکید شده است، این کمپوست می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌کننده‌ی خاک غنی و کارآمد عمل کرده و به بهبود سلامت خاک و رشد گیاهان کمک شایانی کند. این کمپوست حاوی N-تریاکوتانول است که در تقویت رشد گیاه بسیار مؤثر است. کودهای زیستی حاصل از ضایعات چای می‌توانند رشد و بهره‌وری محصول را افزایش دهند و منجر به افزایش قابل توجه عملکرد انواع محصولات گیاهی و میوه‌ای شوند (۶۳-۶۱). در نهایت، توسعه‌ی محصولات کمپوست چندمنظوره باید به‌عنوان یک راهبرد کلیدی مورد توجه قرار گیرد. ترکیب ضایعات چای با سایر پسماندهای کشاورزی، از جمله کودهای دامی و طیور، امکان تولید کودهای ترکیبی با کیفیت بالاتر را فراهم می‌کند. این کودها ضمن بهبود ساختار فیزیکی خاک، آزادسازی تدریجی و پایدار عناصر غذایی را تضمین کرده و در نتیجه، حاصل‌خیزی خاک و بهره‌وری محصولات کشاورزی را در بلندمدت افزایش می‌دهند.

#### کاربرد در تصفیه‌ی آب و پساب

صنعتی‌شدن شهرهای مدرن به رهاسازی مقادیر قابل توجهی از آلاینده‌های سمی و فلزات سنگین در محیط‌زیست منجر شده است. این تخلیه کنترل‌نشده، تهدیدی جدی برای سلامت محیط‌زیست و ایمنی عمومی به شمار می‌رود (۶۴). در راستای مقابله با این معضل، جذب سطحی به‌عنوان یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌ها برای تصفیه‌ی فاضلاب شناخته می‌شود (۶۵). ضایعات چای به‌عنوان یک جاذب طبیعی بسیار مؤثر برای حذف آلاینده‌ها عمل می‌کند. اجزای اصلی تفاله چای شامل سلولز، همی‌سلولز، تانن‌ها، لیگنین و پروتئین‌ها هستند. این ترکیبات دارای گروه‌های عاملی متنوعی مانند

هیدروکسیل، کربوکسیلات آروماتیک، آمینو، سولفونیک، آلکوکسی و فنولی می‌باشند. این گروه‌ها نقش مهمی در تسهیل جذب فیزیکوشیمیایی فلزات سنگین و دیگر آلاینده‌ها ایفا می‌کنند (۶۶). تفاله‌ی چای به‌واسطه ویژگی‌هایی هم‌چون ظرفیت سطحی بالا و سینتیک جذب سریع، به‌عنوان یک جاذب کم‌هزینه برای حذف آلاینده‌ها از فاضلاب قابل استفاده است. هم‌چنین می‌تواند به‌عنوان ماده‌ی اولیه ارزان‌قیمت برای تولید کربن فعال نیز به‌کار رود (۶۷). مقدار فراوان و دسترسی آسان به این پسماند، تبدیل آن به جاذب را از نظر اقتصادی ممکن می‌سازد و از این‌رو مزایایی فراتر از تصفیه‌ی پسماند ارائه می‌دهد (۶۸). علاوه بر تفاله چای خام، شکل‌های اصلاح‌شده شیمیایی و مغناطیسی آن نیز به‌طور گسترده برای تصفیه‌ی آب‌های آلوده به رنگ و فلزات سنگین استفاده شده‌اند (۶۹). پس از اصلاح شیمیایی و یا حرارتی تفاله‌ی چای خام، جاذب دارای جایگاه‌های فعال بیشتر، خواص بهتر تبادل یونی و گروه‌های عاملی جدیدی می‌شود که فرایند حذف آلاینده‌ها را آسان‌تر می‌کنند (۷۰). در کنار داشتن گروه‌های عاملی مشخص و دیواره‌های سلولی نامحلول که قادر به جذب آلاینده‌ها هستند، تفاله‌ی چای می‌تواند گزینه‌ای بالقوه برای حذف آلاینده‌ها در محلول‌های آبی باشد (۶۵). گزارش شده است که تفاله‌ی چای آغشته به نانوذرات مغناطیسی، کارایی بالایی در حذف یون‌های نیکل در دماهای آغازین پایین نشان می‌دهد. میزان حذف یون سرب توسط تفاله‌ی چای در شرایط مختلف، بیشتر از یون‌های مس و روی بوده است (۷۱). آزمایش‌های انجام شده روی جذب یون کروم شش‌ظرفیتی با استفاده از انواع تفاله‌ی چای نشان داده است که تفاله‌ی چای سیاه در شرایط بهینه، بیشترین کارایی را در حذف کروم دارد. این کارایی بالا ممکن است به‌دلیل تغییر ساختار حفره‌ای چای سیاه در اثر دمای تخمیر در طی فرایند تولید باشد که به افزایش جذب کروم کمک می‌کند. کبیر و همکاران در سال ۲۰۲۱، استفاده از ضایعات چای قلیایی شده را به‌عنوان جایگزینی مقرون به صرفه و نوین برای حذف کروم شش‌ظرفیتی از آب آلوده مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه عواملی نظیر زمان تعادل اولیه، pH، دما، غلظت کروم شش‌ظرفیتی و میزان جاذب را ارزیابی کرد. حداکثر ظرفیت جذب برای ضایعات چای قلیایی شده، که بر اساس مدل لانگمویر تعیین شد، ۱۵۸/۷۳ میلی‌گرم بر

ضایعات چای با الیاف کاپوک به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای محصولات کاغذی متداول مطرح شده است؛ زیرا این دو نوع الیاف با یکدیگر هم‌افزایی داشته و محدودیت‌های عملکردی هر یک را جبران می‌کنند. گزارش شده است که افزودن الیاف کاپوک، ویژگی آب‌گریزی کاغذ تولیدشده را در مقایسه با کاغذ حاصل از ضایعات چای خالص تا ۵۲/۳ درصد افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، استفاده از ضایعات فرآوری‌شده چای به همراه عوامل جفت‌کننده نمکی می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های مبتنی بر لاستیک طبیعی شود (۷۳). لجن تولید شده از کارخانه‌های کاغذسازی، که در گذشته به‌دلیل محدودیت‌های فناورانه به‌صورت کنترل‌نشده دفع می‌شد، اکنون پتانسیل بالایی برای استفاده مجدد و بازیافت دارد. این لجن، که معمولاً دارای محتوای غذایی پایین و نسبت کربن به نیتروژن (C/N) بالایی است، برای تولید کمپوست با کیفیت بالا باید با سایر مواد آلی و غنی‌تر از مواد غذایی ترکیب شود. این ترکیب با هدف بهبود کیفیت کمپوست و افزایش ارزش غذایی آن صورت می‌گیرد (۷۴-۷۵).

### روش‌های استخراج مواد زیست‌فعال از ضایعات چای

روش‌های متداول استخراج مواد زیست‌فعال از تفاله چای، مانند حرارت‌دهی، جوشاندن و استخراج سوکسله، با محدودیت‌هایی از جمله کاهش بازده، تخریب ترکیبات حساس و افت پایداری مواجه هستند. از این‌رو، صنعت غذا به‌دنبال روش‌های استخراجی کم‌مصرف، سریع، ایمن و کارآمد است که حداقل تغییرات ساختاری و واکنش‌های اکسایشی را در ترکیبات زیست‌فعال ایجاد کنند (۳۳). در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین نظیر استخراج با کمک امواج فراصوت، استخراج با سیال فوق‌بحرانی و استخراج تحت فشار بالا به‌طور گسترده در صنایع غذایی مورد توجه قرار گرفته‌اند (۲۵). هم‌چنین، استفاده از فناوری میکروکپسوله‌سازی برای عصاره‌ی تفاله‌ی چای، ضمن افزایش پایداری و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، امکان توسعه سامانه‌های نوین رسانش مواد فعال را فراهم کرده است (۷۶). فناوری هموزنی‌اسیون پرفشار به‌عنوان روشی بدون حرارت، بدون حلال و مقیاس‌پذیر، کارایی بالایی در استخراج ترکیبات حساس به دما از بافت‌های گیاهی نشان داده و برای کاربردهای صنعتی ارزش‌افزوده در

گرم گزارش شده است. در پژوهشی دیگر، جیاسیلان و گوپتا در سال ۲۰۱۶، اثربخشی ضایعات چای سبز تصفیه نشده را در حذف کروم شش‌ظرفیتی از محلول آبی با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، به روش دسته‌ای بررسی کردند. در این مطالعه، تفاله‌ی چای خشک‌شده تا زمان رسیدن به تعادل هم زده شد و غلظت کروم شش‌ظرفیتی با استفاده از اسپکتروفوتومتر UV در طول موج ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد که حداکثر راندمان حذف (تقریباً ۹۹ درصد) در pH بهینه ۲ و پس از ۱۸۰ دقیقه هم زدن حاصل شد. علاوه بر کروم، چراغی و همکاران در سال ۲۰۱۵، چگونگی حذف یون‌های سرب توسط ضایعات چای را مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین، زورو و لاوچیا در سال ۲۰۱۰، اثربخشی ضایعات چای سیاه و سبز تصفیه نشده را در حذف یون‌های سرب ارزیابی کردند و دریافتند که این روش در مقایسه با استفاده از خاک رس فولر و کربن فعال، مزیت بیشتری دارد. این مطالعات نشان می‌دهند که جاذب‌های مبتنی بر تفاله چای می‌توانند به‌طور مؤثری فلزات سنگین را حذف و تصفیه کنند و اغلب کارایی جذب بسیار مطلوب یا رضایت‌بخشی دارند. با این حال، میزان واقعی جذب در کاربردهای عملی ممکن است بسته به عواملی مانند ویژگی‌های رنگ، منشأ تفاله چای و شرایط آزمایشگاهی متفاوت باشد.

### کاربرد در محصولات کاغذی

ضایعات چای کارخانه‌ای به‌دلیل پتانسیل بالای آن‌ها برای استفاده به‌عنوان الیاف کوتاه، می‌توانند به‌عنوان ماده اولیه‌ای ارزشمند در صنایع خمیر و کاغذ مورد بهره‌برداری قرار گیرند. لیگنین موجود در این ضایعات نقش یک عامل اتصال‌دهنده طبیعی را ایفا کرده و با پیوند دادن الیاف سلولزی، موجب تشکیل ساختارهای الیافی تقویت‌شده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با کاهش میزان لیگنین، شکستن این الیاف دشوارتر خواهد بود (۱۲). هم‌چنین، فرآیند سفیدسازی می‌تواند دستیابی به ویژگی‌های رنگی مطلوب در خمیر کاغذ تولیدشده از ضایعات چای را تسهیل کند (۳۸). مطالعات نشان داده‌اند که انجام عملیات قلیایی با استفاده از ۱۵ تا ۲۵ درصد وزنی سدیم هیدروکسید (NaOH) موجب بهبود پیوند بین الیاف ضایعات چای شده و در نتیجه، کاغذی با استحکام و مقاومت پارگی قابل قبول تولید می‌شود (۷۲). علاوه بر این، ترکیب

پسماندهای کشاورزی بسیار مناسب ارزیابی شده است (۷۷). در همین راستا، استخراج با حلال‌های زیر بحرانی، به‌ویژه سامانه‌های آب-تانول، توانسته است محتوای پلی‌فنول‌ها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره تفاله چای را نسبت به استخراج با آب داغ به‌طور چشمگیری افزایش دهد (۱۷). هم‌چنین نتیجه تحقیق دیگری نشان داد استخراج با حلال زیر بحرانی با استفاده از اتانول به‌عنوان کمک‌حلال، روشی کارآمد برای بازیابی ترکیبات فنلی از چای سیاه مصرف‌شده می‌باشد (۷۸). با وجود مزایای زیست‌محیطی و عملکردی این روش‌ها، چالش‌هایی مانند پیچیدگی فرایند، زمان‌بر بودن، نیاز به کنترل دقیق شرایط پرفشار یا دمایی و احتمال تخریب ترکیبات زیست‌فعال حساس هم‌چنان پابرجاست. بنابراین، بهینه‌سازی شرایط استخراج و انتخاب راهبردهای ترکیبی، برای بهره‌برداری مؤثر از تفاله چای به‌عنوان منبعی ارزشمند از مواد زیست‌فعال ضروری است.

### تبدیل و بیوتکنولوژی فرآوری ضایعات چای

#### تولید بیوپچار از ضایعات چای

در دهه‌های اخیر، تخریب اراضی کشاورزی و منابع طبیعی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به یکی از چالش‌های اصلی توسعه پایدار تبدیل شده است. کاهش پوشش گیاهی، افت ماده آلی خاک و فرسایش فیزیکی و شیمیایی، از عوامل کلیدی تشدید این روند محسوب می‌شوند. ماده‌ی آلی خاک به‌عنوان ستون فقرات حاصلخیزی و پایداری اکوسیستم‌های زراعی، نقشی اساسی در بهبود ساختار خاک، چرخه عناصر غذایی و حفظ رطوبت ایفا می‌کند. در مقابل، انباشت و تجزیه ناقص ضایعات آلی کشاورزی، از جمله ضایعات چای، می‌تواند منجر به آلودگی آب، خاک و هوا شود. با این حال، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین زیستی و حرارتی امکان تبدیل این ضایعات به محصولات باارزش و دوستدار محیط‌زیست را فراهم کرده است (۷۹). بیوپچار یکی از مهم‌ترین محصولات حاصل از این رویکرد است که به‌عنوان یک جامد غنی از کربن، از طریق فرایندهایی نظیر پیرولیز، گازی‌سازی و کربنیزاسیون هیدروترمال زیست‌توده در شرایط محدود یا فاقد اکسیژن تولید می‌شود (۱۳، ۳۵). این ماده دارای ساختار متخلخل پیشرفته، سطح ویژه بالا، گروه‌های عاملی فراوان و اجزای معدنی غیرآلی با ماهیت آروماتیک است (۸۰). علاوه بر

شرایط پیرولیز، روش‌های فعال‌سازی شیمیایی نقش مهمی در بهبود عملکرد بیوپچار دارند. استفاده از موادی مانند  $\text{HCl}$ ،  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ،  $\text{NaOH}$ ،  $\text{KOH}$ ،  $\text{ZnCl}_2$  یا  $\text{KHCO}_3$  می‌تواند منجر به توسعه ریزحفره‌ها، افزایش سطح ویژه و بهبود ظرفیت جذب بیوپچار شود (۱۲). مطالعات نشان داده‌اند که بیوپچار اصلاح‌شده حاصل از تفاله چای می‌تواند به‌عنوان جاذب مؤثر برای آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین و آنتی‌بیوتیک‌ها عمل کند و کارایی بالایی در تصفیه آب و فاضلاب داشته باشد (۸۱). در بخش کشاورزی، کاربرد بیوپچار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک، نتایج قابل‌توجهی به‌همراه داشته است. بیوپچار با بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب، تنظیم pH و افزایش دسترسی عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منیزیم، موجب ارتقای حاصلخیزی خاک و افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (۸۲). به‌ویژه بیوپچار مشتق‌شده از ضایعات چای در خاک‌های شور، نسبت پتاسیم به سدیم بالاتری نشان می‌دهد که بیانگر توان آن در کاهش شوری و بهبود شرایط رشد گیاهان است (۸۳). علاوه بر این، بیوپچار می‌تواند به‌عنوان حامل مکانیکی برای تثبیت و پراکنش نانوذرات مهندسی‌شده مورد استفاده قرار گیرد. تبدیل تفاله‌ی چای به بیوپچار مغناطیسی یا کامپوزیت‌های زیستی، امکان استفاده از آن را در کاربردهای پیشرفته‌ای مانند حذف فسفر از محیط‌های تخمیری، تصفیه‌ی فاضلاب و حتی ذخیره‌سازی انرژی فراهم می‌سازد (۸۵-۸۴). به‌طور کلی، بیوپچار حاصل از ضایعات چای نه‌تنها راهکاری مؤثر برای مدیریت پایدار پسماندهای کشاورزی است، بلکه ابزاری کارآمد برای مقابله با تغییرات اقلیمی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، بهبود کیفیت خاک و ارتقای بهره‌وری کشاورزی محسوب می‌شود. این ویژگی‌ها، بیوپچار را به یکی از کلیدی‌ترین محصولات در چارچوب رویکرد «تبدیل ضایعات به ارزش» و توسعه پایدار منابع طبیعی تبدیل کرده است.

#### تولید سوخت زیستی (بیواتانول و بیودیزل)

سوخت‌های زیستی نظیر بیودیزل و بیواتانول به‌عنوان جایگزین‌های مؤثر برای سوخت‌های فسیلی، نقش مهمی در تأمین پایدار انرژی جهانی ایفا می‌کنند (۸۶). در این میان، ضایعات چای به‌دلیل ارزش حرارتی نسبتاً بالا، حدود ۱۷/۲۳ مگاژول بر کیلوگرم، به‌عنوان یک منبع

بیواتانول است، بلکه به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی، می‌تواند به بهبود کیفیت و طول عمر سوخت‌های زیستی نیز منجر شود، که از اهمیت ویژه‌ای در صنعت انرژی برخوردار است.

### تولید بیوگاز از ضایعات چای

بیوگاز یکی از مهم‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین سوخت‌های تجدیدپذیر است که از تجزیه‌ی مواد آلی در شرایط بی‌هوازی و در غیاب اکسیژن تولید می‌شود. بر اساس تعریف اتحادیه اروپا (۲۰۰۲)، بیوگاز حاصل تجزیه‌ی اجزای زیست‌تجزیه‌پذیر محصولات، پسماندها و ضایعات کشاورزی شامل مواد گیاهی و دامی، منابع جنگلی و صنایع وابسته و هم‌چنین ضایعات صنعتی و شهری تجزیه پذیر است. مواد اولیه‌ای نظیر کودهای دامی، ضایعات غذایی، پسماندهای کشاورزی و فاضلاب از طریق فرایند هضم بی‌هوازی به بیوگاز تبدیل می‌شوند. ترکیب بیوگاز معمولاً شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد متان است و به همین دلیل قابلیت اشتعال بالایی دارد. انرژی این گاز از واکنش گازهایی مانند متان، هیدروژن و منواکسیدکربن با اکسیژن موجود در هوا آزاد می‌شود. بیوگاز گازی بی‌رنگ و بی‌بو است که در دمای حدود ۶۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد مشتعل می‌شود و دارای راندمان احتراق حدود ۶۰ درصد و ارزش حرارتی نزدیک به ۲۰ مگاژول بر مترمکعب است. به‌واسطه‌ی این ویژگی‌ها، بیوگاز به‌طور گسترده برای پخت‌وپز، گرمایش و سرمایش، تولید برق، تولید بخار و متانول، مدیریت پسماند و تأمین نیروی مکانیکی در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر، تقاضا برای بیوگاز به‌عنوان منبعی پایدار و پاک، به‌ویژه در بخش‌های کشاورزی و صنعتی، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (۹۲). بیوگاز معمولاً در شرایط مزوفیل و در هاضم‌های زیستی، از جمله هاضم‌های گنبدی‌شکل، تولید می‌شود (۹۳). در این میان، ضایعات چای به‌عنوان یکی از پسماندهای زیست‌توده کشاورزی، پتانسیل بالایی برای تولید بیوگاز دارند. مطالعات نشان داده‌اند که هضم بی‌هوازی ضایعات چای با اندازه ذرات کمتر از ۲/۵ میلی‌متر طی حدود ۳۰ روز می‌تواند متانی با بازده حدود ۰/۲ لیتر به‌ازای هر گرم ماده خشک و با محتوای متان ۶۰ تا ۶۵ درصد تولید کند (۲۲). افزون بر تولید انرژی، پسماند باقی‌مانده از فرایند هضم بی‌هوازی ضایعات چای حاوی مقادیر قابل توجهی از

زیست‌توده‌ای امیدبخش برای تولید سوخت‌های زیستی مطرح شده است (۱۲، ۸۷). استفاده از زیست‌توده در تولید سوخت‌های زیستی می‌تواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و به توسعه سامانه‌های انرژی پایدار کمک کند (۸۸). بیودیزل که از روغن‌ها و لیپیدها تولید می‌شود، یکی از مهم‌ترین جایگزین‌های سوخت‌های متداول محسوب می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که ضایعات چای می‌توانند به‌عنوان کاتالیزورهای مؤثر در فرایند تولید بیودیزل مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال، کاتالیزورهای استری‌سازی تهیه‌شده از برگ‌های چای سیاه دورریز قادرند تا حدود ۹۷ درصد اسیدهای چرب آزاد را به بیودیزل تبدیل کنند (۱۲، ۸۷). این کاتالیزورها به دلیل هزینه‌ی تولید پایین، دسترسی آسان و قابلیت استفاده مجدد، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای صنعتی در مقیاس بزرگ به‌شمار می‌روند. هم‌چنین، ضایعات چای سیاه سولفون‌شده فعالیت کاتالیزوری بالایی در واکنش‌های استری‌سازی از خود نشان داده‌اند (۸۹). یکی از چالش‌های مهم در استفاده از بیودیزل، کاهش پایداری ذخیره‌سازی آن در اثر اکسیداسیون است. در این راستا، آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی استخراج‌شده از برگ‌های چای سبز و سیاه می‌توانند به‌طور مؤثری پایداری اکسیداتیو بیودیزل را بهبود بخشند و عمر نگهداری آن را افزایش دهند (۲۲). تولید بیواتانول نیز شامل مراحل پیش‌فرآوری زیست‌توده، هیدرولیز و تخمیر است. پیش‌فرآوری موجب افزایش تخلخل، کاهش تبلور سلولز و جداسازی همی‌سلولز و لیگنین می‌شود که در نهایت بازده تولید اتانول را افزایش می‌دهد (۹۰). مطالعات نشان می‌دهند که ضایعات چای، به‌عنوان یک منبع غنی از لیگنوسلولز، ظرفیت بالایی برای تولید بیواتانول دارند، به‌خصوص هنگامی که از سویه‌های مخمری با قابلیت تخمیر زیلوژ استفاده شود (۹۱). این امر، ضایعات چای را به گزینه‌ای اقتصادی و کارآمد برای تولید سوخت‌های زیستی تبدیل می‌کند. علاوه بر این، حضور ترکیبات فنلی فراوان در ضایعات چای، این ماده را به یک آنتی‌اکسیدان طبیعی و مقرون‌به‌صرفه تبدیل کرده است. این ویژگی می‌تواند به افزایش دوام و پایداری سوخت‌های زیستی در طولانی مدت و در شرایط نگهداری مختلف کمک کند. بنابراین، استفاده از ضایعات چای نه‌تنها راهی برای تولید پایدار

عناصر غذایی ضروری از جمله نیتروژن، پتاسیم و فسفر است که این ویژگی امکان استفاده از آن را به عنوان کود زیستی فراهم می‌سازد. برآوردها نشان می‌دهد که از ۱۸/۵ کیلوگرم ضایعات چای می‌توان حدود ۰/۴۶ مترمکعب بیوگاز در روز تولید کرد. در مقیاس صنعتی نیز، کارخانه‌های چای قادرند با استفاده از برگ‌های چای خام دورریز، روزانه مقادیر قابل توجهی بیوگاز با ارزش حرارتی بالا تولید کرده و از آن برای تأمین انرژی حرارتی و الکتریکی واحدهای مستقر در مزارع چای بهره ببرند (۹۴). کارایی تولید بیوگاز از ضایعات چای به‌طور قابل توجهی با هضم همزمان افزایش می‌یابد. اختلاط ضایعات چای با مواد آلی غنی از کربن یا کود گاوی در راکتورهای بی‌هوازی، در مقایسه با هضم تک‌سویستره، می‌تواند تولید متان را تا چهار برابر افزایش دهد. این بهبود عملکرد عمدتاً به محتوای بالای نیتروژن ضایعات چای نسبت داده می‌شود که تعادل مناسب‌تری در نسبت کربن به نیتروژن ایجاد می‌کند (۹۵). به‌عنوان نمونه، بیشترین بازده بیوگاز و غلظت متان حدود ۷۰ درصد در شرایطی به‌دست آمد که نسبت سوستر شامل ۷۰ درصد کود گاوی و ۳۰ درصد ضایعات چای و زمان هضم حدود ۲۵ روز بود (۹۶). با وجود مزایای متعدد، یکی از محدودیت‌های اصلی بیوگاز، محتوای نسبتاً بالای دی‌اکسیدکربن است که می‌تواند ارزش حرارتی آن را کاهش دهد. از این‌رو، ارتقای بیوگاز و حذف دی‌اکسیدکربن برای کاربردهای با ارزش افزوده بالا ضروری است. در این راستا، استفاده از کربن فعال تهیه‌شده از ضایعات چای به‌عنوان جاذب، رویکردی مؤثر برای حذف دی‌اکسید کربن و بهبود کیفیت بیوگاز گزارش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که ضایعات چای می‌توانند نقشی دوگانه، هم به‌عنوان ماده اولیه تولید بیوگاز و هم به‌عنوان جاذب در فرایند ارتقای آن، ایفا کنند.

### تولید بیوپلاستیک

پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوب ناشی از مصرف گسترده پلاستیک‌های پایه‌نفتی، توجه پژوهشگران را به توسعه مواد بسته‌بندی پایدار و زیست‌تخریب‌پذیر معطوف کرده است. در این میان، تفاله و ضایعات چای به‌عنوان یک منبع زیست‌توده‌ای فراوان و کم‌هزینه، گزینه‌ای مناسب برای تولید فیلم‌ها و ورق‌های پلاستیکی زیست‌تخریب‌پذیر

به‌شمار می‌روند (۹۸-۹۷). تولید بیوپلاستیک از ضایعات چای، یک رویکرد نوین و دوست‌دار محیط‌زیست است. این روش با سادگی، عدم سمیت، شرایط عملیاتی ملایم، زمان فرآیند کوتاه و عدم تولید پسماند ثانویه شناخته می‌شود و توسط (۹۹) نیز مورد تایید قرار گرفته است. ضایعات لیگنوسلولزی صنعت چای، منابع غنی از سلولز و لیگنین هستند که هر دو از فراوان‌ترین بیوپلیمرهای طبیعی محسوب می‌شوند (۱۰۰). برهم‌کنش میان مولکول‌های سلولز و پلی‌فنول‌های موجود در تفاله‌ی چای، از طریق تشکیل پیوندهای هیدروژنی متعدد، به ایجاد ساختاری یکنواخت و خواص فیزیکی مطلوب در فیلم‌های کامپوزیتی سلولز/پلی‌فنول منجر می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش محتوای پلی‌فنول چای موجب بهبود مقاومت فیلم‌ها در برابر اشعه فرابنفش می‌شود و در عین‌حال، به‌دلیل حضور گروه‌های فنولی-هیدروکسیلی، خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتری قابل توجهی نیز ایجاد می‌کند (۱۰۱-۱۰۲). با وجود این، فیلم‌های تک‌سازه سنتی معمولاً با محدودیت‌هایی نظیر استحکام مکانیکی پایین و پایداری حرارتی ناکافی مواجه‌اند. برای رفع این نقیصه، تولید فیلم‌های کامپوزیتی چندلایه با استفاده از ماتریس‌هایی مانند ژلاتین و آلژینات، همراه با عصاره تفاله چای به‌عنوان عامل پیونددهنده و جزء فعال، پیشنهاد شده است. این فیلم‌ها که به روش ریخت‌گری لایه‌به‌لایه تهیه می‌شوند، دارای ساختاری متراکم‌تر و تعداد بیشتری پیوند هیدروژنی بوده و در نتیجه، بهبود چشمگیری در خواص سدّ فرابنفش، استحکام مکانیکی، مقاومت در برابر نفوذ اکسیژن و بخار آب، پایداری حرارتی و مقاومت رطوبتی از خود نشان می‌دهند (۱۰۳). از سوی دیگر، ترکیب ضایعات صنعت چای با کوپلیمرهایی مانند اسیدسیتریک، امکان تولید بیوپلاستیک‌هایی با خواص مکانیکی قابل‌قبول را فراهم کرده است؛ به‌گونه‌ای که مقاومت کششی، ازدیاد طول و ویژگی‌های آب‌گریزی این مواد آن‌ها را برای کاربردهای بسته‌بندی مناسب می‌سازد (۹۹). این بیوپلاستیک‌ها به‌راحتی تحت فعالیت میکروبی هوازی تجزیه می‌شوند و از این‌رو، جایگزینی سازگار با محیط‌زیست برای پلاستیک‌های متداول به‌شمار می‌آیند (۳۳). هم‌چنین، استفاده از الیاف نانومتری حاصل از الکتروسیسی عصاره چای سیاه در بسته‌بندی مواد غذایی هیدروفیل و اسیدی نتایج امیدوارکننده‌ای نشان داده است

مطلوب شدند (۳۱). علاوه بر این، برگ‌های چای دورریز به‌عنوان ماده‌ای بالقوه برای تولید در مقیاس بزرگ کامپوزیت‌های کربن-سولفور مطرح شده‌اند که امکان استفاده از کاتدهای سولفوری در باتری‌های لیتیوم-سولفور را فراهم می‌کنند (۱۰۹). در کنار بهینه‌سازی ساختار حفره‌ای، مطالعاتی نیز به‌منظور رفع محدودیت‌هایی نظیر رسانایی الکتریکی پایین و ترشوندگی نامناسب الکترودها انجام شده است. برای مثال، کربن فعال با توزیع میکروحفره‌ای مناسب و درجه بالای گرافیتی‌شدن می‌تواند از طریق فعال‌سازی و کربنیزه‌کردن برگ‌های چای تولید شود. این ساختار متخلخل توسعه‌یافته و خاصیت فوق‌آب‌دوستی، نفوذ آسان الکترولیت را تسهیل کرده و عملکرد لایه دوتایی ابرخازن‌ها را بهبود می‌بخشد (۱۱۰). که در نهایت موجب افزایش پایداری چرخه‌ای الکترودها می‌شود (۱۱۱). در مطالعه‌ای دیگر، پس از تیمار اسیدی و تجزیه‌ی متانولی، کاتالیست‌های غیرفلزی تهیه‌شده از پسماند برگ‌های چای سیاه و سبز به‌عنوان الکترودها ابرخازن مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که الکترودهای مشتق از تفاله چای سبز، در مقایسه با چای سیاه، عملکرد الکتروشیمیایی بهتری داشته و در فرایندهای تولید هیدروژن و سامانه‌های مرتبط با تجزیه  $\text{NaBH}_4$  سازگاری بالاتری از خود نشان می‌دهند (۱۱۲). در مجموع، این مطالعات نشان می‌دهد که مواد کربنی متخلخل حاصل از تفاله چای پتانسیل بالایی به‌عنوان مواد الکترودی پیشرفته در ابرخازن‌ها دارند. این رویکرد نه تنها راهکاری پایدار برای ذخیره‌سازی انرژی ارائه می‌دهد، بلکه با بازاستفاده مؤثر از پسماندهای جامد، آن‌ها را به منابعی ارزشمند تبدیل کرده و گامی مؤثر در جهت توسعه فناوری‌های سبز و حفاظت از محیط‌زیست محسوب می‌شود.

### آئروژل‌ها و هیدروژل‌ها

پسماندهای غنی از سلولز، به‌ویژه تفاله چای، به‌دلیل فراوانی، تجدیدپذیری و ساختار شیمیایی مناسب، پتانسیل چشمگیری برای توسعه مواد پیشرفته و کاهش هزینه‌های اقتصادی دارند. این ویژگی‌ها، تفاله چای را به گزینه‌ای ایده‌آل برای نوآوری‌های پایدار تبدیل می‌کند. سلولز، جزء اصلی موجود در تفاله چای، یک پلیمر خطی است که از واحدهای  $\beta\text{-D}$  گلوکوپیرانوز تشکیل شده

(۱۰۴). در نمونه‌ای دیگر، فیلم‌های کامپوزیتی تهیه‌شده از ضایعات چای سبز و پسماند پایپا، ضمن برخورداری از زیست‌تخریب‌پذیری بالا، خواص آنتی‌اکسیدانی و محافظت در برابر اشعه فرابنفش مناسبی ارائه کرده‌اند (۱۰۵). در مجموع، بهره‌گیری از بیوپلاستیک‌های آب‌گریز مشتق‌شده از ضایعات چای می‌تواند به‌عنوان جایگزینی کارآمد برای پلاستیک‌های پایه‌نفتی در صنعت بسته‌بندی مطرح شود و ضمن کاهش مصرف منابع فسیلی، از آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از پلاستیک‌های غیرقابل بازیافت بکاهد (۹۷، ۱۰۶). با این حال، تعیین غلظت بهینه پلی‌فنول‌ها و تنظیم دقیق برهم‌کنش اجزای سازنده فیلم‌ها همچنان چالشی مهم است که نیازمند پژوهش‌های تکمیلی برای دستیابی به خواص هدفمند در کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی می‌باشد.

### ابرخازن‌ها

با کاهش روزافزون منابع سوخت‌های فسیلی، توجه فزاینده‌ای به تبدیل پسماندهای زیستی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی به منابع انرژی ارزشمند معطوف شده است. در این میان، تفاله چای به‌عنوان یک پسماند زیست‌تخریب‌پذیر، کم‌هزینه و پربازده که عمدتاً در کشورهایی نظیر هند و چین تولید می‌شود، به‌عنوان ماده‌ای امیدبخش برای کاربردهای انرژی مطرح شده است. ابرخازن‌ها نیز به دلیل توان بالا، قابلیت شارژ و دشارژ سریع و دوام چرخه‌ای مناسب، به‌عنوان یکی از گزینه‌های برجسته برای ذخیره‌سازی انرژی شناخته می‌شوند. کربن‌های فعال‌شده حاصل از پسماندها می‌توانند جایگزینی سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه برای ساخت الکترودهای ابرخازن فراهم کنند (۱۰۷). ظرفیت بالای الکترودهای کربن فعال‌شده عمدتاً به سطح ویژه زیاد و توزیع مناسب اندازه حفره‌ها نسبت داده می‌شود. این توزیع مطلوب را می‌توان از طریق انتخاب نوع پیش‌ساز و تنظیم روش فعال‌سازی به‌دست آورد (۴۱). در همین راستا، انتخاب بهینه مسیر سنتز امکان تولید کربن‌های کم‌هزینه با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مناسب برای کاربردهای متنوع را فراهم می‌سازد (۱۰۸). به‌عنوان نمونه، خان و همکاران با استفاده از یک فرایند ساده و اقتصادی مبتنی بر تفاله چای، موفق به تولید کربن متخلخل با ظرفیت ویژه بالا و عملکرد الکتروشیمیایی

است. این واحدها از طریق پیوندهای  $1,4-\beta$  گلیکوزیدی به هم متصل‌اند و به دلیل وجود پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی و بین مولکولی، پایداری ساختاری قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. خواص برجسته سلولز موجود در تفاله چای، نقش بالقوه این پسماندها را در پاسخگویی به چالش‌های پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی برجسته می‌کند (۱۱۳). مواد مشتق از سلولز، از جمله آئروژل‌ها، به عنوان مواد با ارزش افزوده بالا در تولید مواد کاربردی، الیاف و اسفنج‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. پس از جداسازی سلولز خالص از تفاله چای از طریق فرایندهای دلیگنیفیکاسیون و حذف همی سلولز، سلولز به صورت درجا (*in situ*) به هیدروژل تبدیل شده و سپس به سازه‌های آئروژلی شکل داده می‌شود. آئروژل‌های سلولزی حاصل، به دلیل برخورداری از تخلخل بالا، عایق حرارتی مطلوب و درجه بلورینگی مناسب، گزینه‌هایی امیدبخش برای کاربردهای گسترده در حوزه‌های مختلف، به ویژه به عنوان مواد عایق حرارتی، محسوب می‌شوند. افزون بر این، فرایند تولید مقرون به صرفه و پایدار، جذابیت این آئروژل‌ها را افزایش داده است (۱۱۴). با وجود این مزایا، ژل‌های مبتنی بر سلولز خالص با مشکل شکنندگی مواجه‌اند که قابلیت استفاده مجدد آئروژل‌ها را محدود می‌کند. به منظور رفع این چالش، تقویت ماتریس سلولزی از طریق افزودن مواد تقویت‌کننده یا استفاده از عوامل شبکه‌ساز به عنوان رویکردی مؤثر گزارش شده است. در این راستا، استفاده از کربوکسی‌متیل سلولز به عنوان عامل شبکه‌ساز، امکان تولید آئروژل‌های کربنی را از طریق کربنیزاسیون پیرولیتی و خشک کردن انجمادی در شرایط بی‌اثر فراهم کرده است. این آئروژل‌های کربنی علاوه بر کاهش شکنندگی، خواص جذب مطلوب و قابلیت ذخیره‌سازی انرژی قابل توجهی از خود نشان داده‌اند (۱۱۵). در یک رویکرد نوین دیگر، استفاده از سامانه هم‌حلال «مایع یونی/دی‌متیل سولفوکسید» برای فرآوری تفاله چای منجر به تولید موفق سلولز میکروکریستالی شده است. طی این فرآیند، تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی میان حلقه‌های پیرانوز سلولز، موجب بازآرایی ساختاری شده و امکان تولید آئروژل‌های سلولزی بازتولیدشده با غلظت‌های مختلف از طریق خشک‌کردن انجمادی هدفمند فراهم شده است. به منظور ارتقای عملکرد فوتوترمال، پوشش

پلی‌آنیلین به عنوان لایه جاذب نور بر سطح آئروژل اعمال شد که موجب افزایش چشمگیر کارایی تبدیل فوتوترمال و بهبود بهره‌وری انرژی از طریق تبخیر میان‌سطحی وابسته به انرژی خورشیدی گردید (۱۱۶). علاوه بر کاربردهای مرتبط با آئروژل‌ها، هیدروژل‌های مشتق از تفاله چای نیز به دلیل ساختار متخلخل و وجود گروه‌های عاملی فعال، توانایی بالایی در جذب یون‌های فلزات سنگین نشان داده‌اند و به عنوان گزینه‌هایی کارآمد برای تصفیه فاضلاب مطرح شده‌اند. در این زمینه، نانوذرات آهن سنتز شده از تفاله چای در ماتریس پلیمری پلی‌وینیل‌الکل و آلژینات سدیم به کار گرفته شدند که منجر به تولید هیدروژل‌های کامپوزیتی با ظرفیت جذب بالای یون‌های  $\text{Cu}^{2+}$  و  $\text{Cr}^{6+}$  شد (۱۱۷). هم‌چنین، سنتز ژل‌های دوشبکه‌ای ماکروحفره‌ای بر پایه تفاله‌ی چای و اسیداکریلیک، ظرفیت جذب و گزینش‌پذیری بالایی برای یون‌های  $\text{Cr}^{3+}$ ،  $\text{Pb}^{2+}$  و  $\text{Fe}^{3+}$  نشان داده است (۶۶). افزون بر این، تفاله چای اصلاح‌شده به عنوان بستر مناسبی برای بارگذاری ترکیبات زیست‌فعال از جمله نقاط کوانتومی کربنی فلورسنت در سامانه‌های هیدروژلی مورد استفاده قرار گرفته است. این سامانه‌ها رفتارهای متفاوتی در رهایش دارو نشان داده و در عین حال، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و مهار رادیکال‌های آزاد قابل توجهی از خود بروز داده‌اند (۱۱۸). در مجموع، تفاله چای نه تنها به عنوان ماده اولیه برای سنتز ژل‌ها، بلکه به عنوان عامل تقویت‌کننده چندمنظوره، مسیرهای نوینی برای بهره‌برداری پایدار از پسماندهای کشاورزی فراهم می‌آورد و نقش مؤثری در کاهش چالش‌های مدیریت پسماند و بهبود پیامدهای زیست‌محیطی ایفا می‌کند.

#### نانومواد کامپوزیتی

ضایعات چای به عنوان یک زیست‌منبع ارزان، در دسترس و غنی از ترکیبات زیست‌فعال، کاربردهای نوظهور و متنوعی در حوزه‌های نانو فناوری، الکتروشمی، تصفیه محیط‌زیست و مواد پیشرفته یافته است (۱۱۱، ۱۱۹). در سال‌های اخیر، نگرانی‌های زیست‌محیطی و الزامات توسعه پایدار موجب توجه فزاینده به سنتز سبز نانوذرات با استفاده از مواد زیستی شده است. در این میان، تفاله چای به دلیل دارا بودن پلی‌فنول‌ها، کاتچین‌ها و کافئین، به عنوان عامل کاهنده و پایدارکننده طبیعی، امکان تولید نانوذرات سازگار با محیط‌زیست از جمله نانوذرات نقره،

## نتیجه‌گیری

ضایعات چای یک منبع کشاورزی دسترس‌پذیر، فراوان و آسان‌فرآوری است. اگرچه تاکنون از ضایعات چای در مدیریت محیط‌زیست، خوراک دام، زیست‌انرژی و مواد بسته‌بندی سبز استفاده شده است، اما همچنان نیاز به توسعه فناوری‌های کم‌هزینه و قابل اجرا در مقیاس بزرگ برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل آن وجود دارد. با تکیه بر پژوهش علمی دقیق و تکنولوژی‌های پیشرفته نوین، هدف اصلی، حداکثرسازی ارزش ضایعات چای در حوزه‌های گوناگون است. این تلاش در راستای راهبرد کلان «تبدیل پسماند به ارزش» قرار دارد؛ راهبردی که به دنبال استخراج بیشترین ارزش ممکن از منابع پسماند است.

**تشکر و قدردانی:** این مقاله مروری کاملاً مستقل است و توسط خود نویسندگان و با جمع‌آوری اطلاعات بیش از صدوپنجاه مقاله انجام شده است.

**تعارض منافع:** نویسندگان هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر تفسیر مقاله تاثیر می‌گذارد را رد می‌کنند.

**حمایت مالی:** این مقاله کاملاً مستقل می‌باشد و هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

**ملاحظات اخلاقی:** تمامی ملاحظات اخلاقی از جمله عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی در این مطالعه رعایت شده است.

**سهام نویسندگان:** مشارکت در جمع‌آوری اطلاعات، ترجمه، نگارش، بازبینی و مرور مقاله توسط نویسندگان به‌صورت مساوی بوده است.

آهن و اکسیدهای فلزی را با هزینه و اثرات زیست‌محیطی کمتر فراهم می‌کند (۱۲، ۱۲۰، ۱۲۱). این نانوذرات، ضمن برخورداری از سمیت پایین، خواص ضدباکتریایی و عملکرد مناسب در کاربردهای زیست‌پزشکی و زیست‌محیطی از خود نشان داده‌اند (۱۲۳-۱۲۲). افزون بر این، ضایعات چای به‌عنوان پیش‌ساز کم‌هزینه برای تولید نقاط کوانتومی کربنی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نقاط به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر پایداری فلورسانس، زیست‌سازگاری، حلالیت بالا در آب و قابلیت تشخیص یون‌های فلزی مانند  $Fe^{3+}$  و  $Cl^{-}$ ، در بیوسنسورها و پایش محیطی کاربرد گسترده‌ای دارند (۱۲۴-۱۲۵). هم‌چنین، بیوچار مشتق از تفاله چای به‌عنوان ماتریس کارآمد برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها و جایگزینی مقرون به‌صرفه برای کربن فعال در حذف فلزات سنگین از آب مطرح شده است (۵۷، ۱۲۶). از سوی دیگر، ضایعات چای منبع غنی سلولز محسوب می‌شوند و قابلیت استخراج سلولز میکروکریستالی و نانوکریستالی با بازده بالا را دارند. این مشتقات به‌دلیل پایداری حرارتی و خواص مکانیکی مطلوب، در کامپوزیت‌های زیستی، صنایع زیست‌پزشکی و دارویی کاربرد دارند (۱۲، ۱۱۱). به‌عنوان نمونه، تفاله‌ی چای اولانگ بازده بالایی از سلولز میکروکریستالی نشان داده و ساقه‌های چای از طریق هیدرولیز اسیدی قادر به تولید سلولز نانوکریستالی با استحکام حرارتی مناسب بوده‌اند (۱۳). در مجموع، این مطالعات نشان می‌دهند که تفاله چای می‌تواند به‌عنوان ماده‌ای چندمنظوره برای تولید نانوذرات سبز، مواد پیشرفته و جاذب‌های زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرد و علاوه بر کاهش پسماند، زمینه‌ساز ارزش‌افزوده اقتصادی و توسعه پایدار باشد.

## References

1. Farag MA, Elmetwally F, Elghanam R, Kamal N, Hellal K, Hamezah HS, et al. Metabolomics in tea products; a compile of applications for enhancing agricultural traits and quality control analysis of *Camellia sinensis*. *Food Chemistry*. 2023;404:134628.
2. Statista. Global: annual tea consumption. 2022 (2012-2025) | Statista. <https://www.statista.com/statistics/940102/global-tea-consumption/>. Accessed June 12. 2023..
3. Weerawatanakorn M, Hung W-L, Pan M-H, Li S, Li D, Wan X, et al. Chemistry and health beneficial effects of oolong tea and theasinensins. *Food Science and Human Wellness*. 2015;4(4):133–46.
4. Kosińska A, Andlauer W. Antioxidant capacity of tea: effect of processing and storage. *Processing and impact on antioxidants in beverages*: Elsevier; 2014. p. 109–20.
5. Jin J-Q, Qu F-R, Huang H, Liu Q-S, Wei M-Y, Zhou Y, et al. Characterization of two O-methyltransferases involved in the biosynthesis of O-methylated catechins in tea plant. *Nature communications*. 2023;14(1):5075.
6. Morlock GE, Heil J, Inarejos-Garcia AM, Maeder J. Effect-directed profiling of powdered tea extracts for catechins, theaflavins, flavonols and caffeine. *Antioxidants*. 2021;10(1):117.
7. Zahra A, Lim S-K, Shin S-J, Yeon I-J. Properties of green tea waste as cosmetics ingredients and rheology enhancers. *Applied Sciences*. 2022;12(24):12871.
8. Yılmaz C, Özdemir F, Gökmen V. Investigation of free amino acids, bioactive and neuroactive compounds in different types of tea and effect of black tea processing. *Lwt*. 2020;117:108655.
9. Xu J, Wei Y, Huang Y, Weng X, Wei X. Current understanding and future perspectives on the extraction, structures, and regulation of muscle function of tea pigments. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63(33):11522–44.
10. Liu G, Zhu W, Zhang J, Song D, Zhuang L, Ma Q, et al. Antioxidant capacity of phenolic compounds separated from tea seed oil in vitro and in vivo. *Food Chemistry*. 2022;371:131122.
11. Debnath B, Haldar D, Purkait MK. Environmental remediation by tea waste and its derivative products: A review on present status and technological advancements. *Chemosphere*. 2022;300:134480.
12. Debnath B, Haldar D, Purkait MK. Potential and sustainable utilization of tea waste: A review on present status and future trends. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(5):106179.
13. Guo S, Awasthi MK, Wang Y, Xu P. Current understanding in conversion and application of tea waste biomass: A review. *Bioresource Technology*. 2021;338:125530.
14. Chen L, Wang H, Ye Y, Wang Y, Xu P. Structural insight into polyphenol oxidation during black tea fermentation. *Food Chemistry: X*. 2023;17:100615.
15. Danmatam N, Pearce J, Pattavarakorn D. UV-blocking properties of carboxymethyl cellulose film integrated with oolong tea extracts as eco-friendly packaging film. *Materials Today: Proceedings*. 2023;77:1052–8.
16. Beaudor M, Vauchel P, Pradal D, Aljawish A, Phalip V. Comparing the efficiency of extracting antioxidant polyphenols from spent coffee grounds using an innovative ultrasound-assisted extraction equipment versus conventional method. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2023;188:109358.
17. Rajapaksha S, Shimizu N. Pilot-scale extraction of polyphenols from spent black tea by semi-continuous subcritical solvent extraction. *Food Chemistry: X*. 2022;13:100200.
18. Ravindran R, Desmond C, Jaiswal S, Jaiswal AK. Optimisation of organosolv pretreatment for the extraction of polyphenols from spent coffee waste and subsequent recovery of fermentable sugars. *Bioresource Technology Reports*. 2018;3:7–14.
19. İçen H, Gürü M. Effect of ethanol content on supercritical carbon dioxide extraction of caffeine from tea stalk and fiber wastes. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2010;55(1):156–60.
20. Yuan Y, Ma M, Zhang S, Wang D. Efficient utilization of tea resources through encapsulation: dual perspectives from core material to wall material. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2023;71(3):1310–24.

21. Rajapaksha SW, Shimizu N. Development and characterization of functional starch-based films incorporating free or microencapsulated spent black tea extract. *Molecules*. 2021;26(13):3898.
22. Debnath B, Purkait MK. Sustainable utilization of tea waste. *Agricultural Waste: Environmental Impact, Useful Metabolites and Energy Production*: Springer; 2023. p. 245–75.
23. Chowdhury A, Sarkar S, Chowdhury A, Bardhan S, Mandal P, Chowdhury M. Tea waste management: a case study from West Bengal, India. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016;9(42):1–6.
24. Sui W, Xiao Y, Liu R, Wu T, Zhang M. Steam explosion modification on tea waste to enhance bioactive compounds' extractability and antioxidant capacity of extracts. *Journal of Food Engineering*. 2019;261:51–9.
25. Ozsefil IC, Ziylan-Yavas A. Green approach for polyphenol extraction from waste tea biomass: Single and hybrid application of conventional and ultrasound-assisted extraction. *Environmental Research*. 2023.۲۳۵:۱۱۶۷۰۳;
26. Abdeltaif SA, SirElkhatim KA, Hassan AB. Estimation of phenolic and flavonoid compounds and antioxidant activity of spent coffee and black tea (processing) waste for potential recovery and reuse in Sudan. *Recycling*. 2018;3(2):27.
27. Mago M, Yadav A, Gupta R, Garg V. Management of banana crop waste biomass using vermicomposting technology. *Bioresource Technology*. 2021;326:124742.
28. Gao P, Ogata Y, Liu J, Song C, editors. The methods of tea waste reutilization and economic benefits analysis. 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017); 2017: Atlantis Press.
29. Amarasinghe B, Williams RA. Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. *Chemical engineering journal*. 2007;132(1-3):299–309.
30. Ko S, Yang C. Effect of green tea probiotics on the growth performance, meat quality and immune response in finishing pigs. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2008;21(9):1339–47.
31. Khan A, Senthil RA, Pan J, Osman S, Sun Y, Shu X. A new biomass derived rod-like porous carbon from tea-waste as inexpensive and sustainable energy material for advanced supercapacitor application. *Electrochimica acta*. 2020;335:135588.
32. Faustino M, Veiga M, Sousa P, Costa EM, Silva S, Pintado M. Agro-food byproducts as a new source of natural food additives. *Molecules*. 2019;24(6):1056.
33. Jayakala Devi R, Usha R, Rajkishore S, Raveendran M. Development of economic value-added products from tea waste by thermal and microbial process for environmental sustainability. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;15(4):5111–40.
34. Wang C, Zhong Y, Liu H, Wang H, Li Y, Wang Q, et al. Effects of dietary supplementation with tea residue on growth performance, digestibility, and diarrhea in piglets. *Animals*. 2024;14(4):584.
35. Kumar V, Bhat SA, Kumar S, Verma P, Badruddin IA, Américo-Pinheiro JHP, et al. Tea byproducts biorefinery for bioenergy recovery and value-added products development: A step towards environmental sustainability. *Fuel*. 2023;350:128811.
36. Zheng Q, Han C, Zhong Y, Wen R, Zhong M. Effects of dietary supplementation with green tea waste on growth, digestive enzyme and lipid metabolism of juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*. *Fish physiology and biochemistry*. 2017;43(2):361–71.
37. Nagaraja M, Charles I, Sundaresan R, Natarajan R, Srinivas T. Energy and byproducts recovery from tea waste. *Int J Electr Energy*. 2013;1(1):49–54.
38. Tutuş A, Kazaskeroğlu Y, Çiçekler M. Evaluation of tea wastes in usage pulp and paper production. *BioResources*. 2015;10(3):5407–16.
39. Thiruvengadam V, Baharuddin NHB, Shiun LJ. Implementation of life cycle analysis on green tea process. *Heliyon*. 2023;9.(°)
40. Bazaluk O, Yatsenko O, Zakharchuk O, Ovcharenko A, Khrystenko O, Nitsenko V. Dynamic development of the global organic food market and opportunities for Ukraine. *Sustainability*. 2020;12(17):6963.
41. Ma Q, Xi H, Cui F, Zhang J, Chen P, Cui T. Self-templating synthesis of hierarchical porous carbon with multi-heteroatom co-doping from tea waste for high-performance supercapacitor. *Journal of Energy Storage*. 2022;45:103509.

42. Ramdani D, Jayanegara A, Chaudhry AS. Biochemical properties of black and green teas and their insoluble residues as natural dietary additives to optimize in vitro rumen degradability and fermentation but reduce methane in sheep. *Animals*. 2022;12(3):305.
43. Chutia S, Saikia A, Konwar B, Baruah K, editors. Water treated factory tea waste and pig production. Proceedings of the National Symposium on feeding systems for maximising livestock production, HAU, Hissar; 1983.
44. Konwar BK, Das PC. Tea waste—a new livestock and poultry feed. *Technical bulletin*. 1990;2:1–9.
45. Sundod R, Poothong S, Nuengjamnong C. Substitution effect of protein source with tea waste on productive performances and ruminal fermentation in crossbred Saanen lactating goats. *Italian Journal of Animal Science*. 2023;22(1):453–62.
46. Bortolini DG, Haminiuk CWI, Pedro AC, Fernandes IdAA, Maciel GM. Processing, chemical signature and food industry applications of *Camellia sinensis* teas: An overview. *Food Chemistry: X*. 2021;12:100160.
47. Abdel-Tawwab M, Ahmad MH, Seden ME, Sakr SF. Use of green tea, *Camellia sinensis* L., in practical diet for growth and protection of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.), against *Aeromonas hydrophila* infection. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2010;41:203–13.
48. Kondo M, Nakano M, Kaneko A, Agata H, Kita K, Yokota H-o. Ensiled green tea waste as partial replacement for soybean meal and alfalfa hay in lactating cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2004;17(7):960–6.
49. Chowdhury MR, Chanda S, Shipa A, Saiyara T, Chowdhury ZJ, Khan MMH. Effect of heat-treated green tea waste feeding on fermentation kinetics, in vitro degradability, in vivo apparent digestibility, nitrogen balance, and blood metabolites in Black Bengal goat. *Animal Science Journal*. 2022;93(1):e13704.
50. Liu W, Rouzmehr F, Seidavi A. Effect of amount and duration of waste green tea powder on the growth performance, carcass characteristics, blood parameters, and lipid metabolites of growing broilers. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(1):375–87.
51. Zhuang X, Chen Z, Sun X, Li F, Luo J, Chen T, et al. Fermentation quality of herbal tea residue and its application in fattening cattle under heat stress. *BMC Veterinary Research*. 2021;17(1):348.
52. Yan P, Shen C, Fan L, Li X, Zhang L, Zhang L, et al. Tea planting affects soil acidification and nitrogen and phosphorus distribution in soil. *Agriculture, ecosystems & environment*. 2018;254:20–5.
53. Le VS, Herrmann L, Hudek L, Nguyen TB, Bräu L, Lesueur D. How application of agricultural waste can enhance soil health in soils acidified by tea cultivation: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2022;20(1):813–39.
54. Siedt M, Schäffer A, Smith KE, Nabel M, Roß-Nickoll M, Van Dongen JT. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Science of the Total Environment*. 2021;751:141607.
55. Pan L, Mao L, Zhang H, Wang P, Wu C, Xie J, et al. Modified biochar as a more promising amendment agent for remediation of pesticide-contaminated soils: Modification methods, mechanisms, applications, and future perspectives. *Applied Sciences*. 2022;12(22):11544.
56. Tarashkar M, Matloobi M, Qureshi S, Rahimi A. Assessing the growth-stimulating effect of tea waste compost in urban agriculture while identifying the benefits of household waste carbon dioxide. *Ecological Indicators*. 2023;151:110292.
57. Seth D, Athparia M, Singh A, Rathore D, Venkatramanan V, Channashettar V, et al. Sustainable environmental practices of tea waste—a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025;32(12):7449–67.
58. De Corato U. Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: A review under the perspective of a circular economy. *Science of the Total Environment*. 2020;738:139840.
59. Ahsan MA, Katla SK, Islam MT, Hernandez-Viezcas JA, Martinez LM, Díaz-Moreno CA, et al. Adsorptive removal of methylene blue, tetracycline and Cr (VI) from water using sulfonated tea waste.

- Environmental Technology & Innovation. 2018;11:23–40.
60. Mahaly M, Senthilkumar AK, Arumugam S, Kaliyaperumal C, Karupannan N. Vermicomposting of distillery sludge waste with tea leaf residues. *Sustainable Environment Research*. 2018;28(5):223–7.
  61. Lazcano C, Domínguez J. The use of vermicompost in sustainable agriculture: impact on plant growth and soil fertility. *Soil nutrients*. 2011;10(1-23):187.
  62. Rao JM, Natarajan CP, Seshadri R. A study on the occurrence of N-triacontanol, a plant growth regulator, in tea. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1987;39(2):95–9.
  63. Pane C, Palese AM, Spaccini R, Piccolo A, Celano G, Zaccardelli M. Enhancing sustainability of a processing tomato cultivation system by using bioactive compost teas. *Scientia Horticulturae*. 2016;202:117–24.
  64. Elbasiouny H, Darwesh M, Elbeltagy H, Abo-Alhamd FG, Amer AA, Elsegaiy MA, et al. Ecofriendly remediation technologies for wastewater contaminated with heavy metals with special focus on using water hyacinth and black tea wastes: a review. *Environmental monitoring and assessment*. 2021;193(7):449.
  65. Elbehiry F, Alshaal T, Elhawat N, Elbasiouny H. Environmental-friendly and cost-effective agricultural wastes for heavy metals and toxicants removal from wastewater. *Cost-Efficient Wastewater Treatment Technologies: Natural Systems*: Springer; 2021. p. 107–27.
  66. Zhang S, Liu C, Yuan Y, Fan M, Zhang D, Wang D, et al. Selective, highly efficient extraction of Cr (III), Pb (II) and Fe (III) from complex water environment with a tea residue derived porous gel adsorbent. *Bioresource Technology*. 2020;311:123520.
  67. Hussain S, Anjali K, Hassan ST, Dwivedi PB. Waste tea as a novel adsorbent: a review. *Applied Water Science*. 201. ۱۶۵:(۶)۸;۸
  68. Patil CS, Gunjal DB, Naik VM, Harale NS, Jagadale SD, Kadam AN, et al. Waste tea residue as a low cost adsorbent for removal of hydralazine hydrochloride pharmaceutical pollutant from aqueous media: An environmental remediation. *Journal of cleaner production*. 2019;206:407–18.
  69. Wu J, Annath H, Chen H, Mangwandi C. Upcycling tea waste particles into magnetic adsorbent materials for removal of Cr (VI) from aqueous solutions. *Particuology*. 2023;80:115–26.
  70. Shirvanimoghaddam K, Czech B, Tyszczyk-Rotko K, Kończak M, Fakhrhoseini SM, Yadav R, et al. Sustainable synthesis of rose flower-like magnetic biochar from tea waste for environmental applications. *Journal of Advanced Research*. 2021;34:13–27.
  71. Fatma UK, Nizami G, Ahamad S, Hussain MK. Efficient removal of Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> by waste tea-derived cost-effective bioadsorbent. *ChemistrySelect*. 2023;8(30):e202300944.
  72. Majid RA, Mohamad Z, Rusman R, Zulkornain AA, Halim NA, Abdullah M, et al. Development of tea waste/kapok fiber composite paper. *Chemical Engineering Transactions*. 2018;63:457–62.
  73. Hayemasae N, Ismail H. Application of silane-treated tea waste powder as a potential filler for natural rubber composites. *BioResources*. 2021;16(1):1230.
  74. Simão L, Hotza D, Raupp-Pereira F, Labrincha J, Montedo O. Wastes from pulp and paper mills-a review of generation and recycling alternatives. *Cerâmica*. 2018;64(371):443–53.
  75. Badhwar VK, Singh S, Singh B. Biotransformation of paper mill sludge and tea waste with cow dung using vermicomposting. *Bioresource Technology*. 2020;318:124097.
  76. Baltrusch K, Torres M, Domínguez H, Flórez-Fernández N. Spray-drying microencapsulation of tea extracts using green starch, alginate or carrageenan as carrier materials. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:417–29.
  77. Pirozzi A, Donsì F. Impact of high-pressure homogenization on enhancing the extractability of phytochemicals from Agri-food residues. *Molecules*. 2023;28(15):5657.
  78. Rajapaksha D, Shimizu N. Valorization of spent black tea by recovery of antioxidant polyphenolic compounds: Subcritical solvent extraction and microencapsulation. *Food Science & Nutrition*. 2020;8(8):4297–307.
  79. Soobhany N. Insight into the recovery of nutrients from organic solid waste through biochemical conversion processes for fertilizer production: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019;241:118413.
  80. Zhang Y, Jiang S, Qiu L, Xu K, Kang X, Wang L. Performance and mechanism of

- tea waste biochar in enhancing the removal of tetracycline by peroxodisulfate. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(18):27595–605.
81. Li B, Huang Y, Wang Z, Li J, Liu Z, Fan S. Enhanced adsorption capacity of tetracycline on tea waste biochar with  $\text{KHCO}_3$  activation from aqueous solution. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(32):44140–51.
82. Yan P, Shen C, Zou Z, Fu J, Li X, Zhang L, et al. Biochar stimulates tea growth by improving nutrients in acidic soil. *Scientia Horticulturae*. 2021;283:110078.
83. Abdolahi Arshad M, Rangzan N, Nadian Ghomsheh H. Effect of spent tea waste, compost and biochar on some growth parameters and concentration of nitrogen, phosphorus and potassium in spinach (*Spinacia oleracea* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Nutrition*. 2024;47(7):1029–.٤٤
84. Zhang N, Reguyal F, Praneeth S, Sarmah AK. A green approach of biochar-supported magnetic nanocomposites from white tea waste: Production, characterization and plausible synthesis mechanisms. *Science of the Total Environment*. 2023;886:163923.
85. Feng C, Zhang L, Zhang X, Li J, Li Y, Peng Y, et al. Bio-assembled  $\text{MgO}$ -coated tea waste biochar efficiently decontaminates phosphate from water and kitchen waste fermentation liquid. *Biochar*. 2023;5(1):22.
86. Guragain YN, De Coninck J, Husson F, Durand A, Rakshit SK. Comparison of some new pretreatment methods for second generation bioethanol production from wheat straw and water hyacinth. *Bioresource Technology*. 2011;102(6):4416–24.
87. Basumatary V, Saikia R, Narzari R, Bordoloi N, Gogoi L, Sut D, et al. Tea factory waste as a feedstock for thermo-chemical conversion to biofuel and biomaterial. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(11):23413–22.
88. Kathir I, Haribabu K, Kumar A, Kaliappan S, Patil PP, Dhanalakshmi CS, et al. Utilization of Tea Industrial Waste for Low-Grade Energy Recovery: Optimization of Liquid Oil Production and Its Characterization. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;2022(1):7852046.
89. Rashid U, Ahmad J, Ibrahim ML, Nisar J, Hanif MA, Shean TYC. Single-pot synthesis of biodiesel using efficient sulfonated-derived tea waste-heterogeneous catalyst. *Materials*. 2019;12(14):2293.
90. Mohit SM, Chandrashekhar B, Tanushree C, Kanwal S. Production of bio-ethanol from *Jatropha* oilseed cakes via dilute acid hydrolysis and fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Int J Biotechnol Appl*. 2011;3(1):41–7.
91. Germec M, Turhan I. Ethanol production from acid-pretreated and detoxified tea processing waste and its modeling. *Fuel*. 2018;231:101–9.
92. Manyuchi M, Mbohwa C, Muzenda E, editors. *Biogas and Bio solids production from tea waste through anaerobic digestion*. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management; 2018.
93. Manyuchi MM, Mbohwa C, Muzenda E, Masebinu S, editors. *Techno economic assessment for setting up a viable biogas plant at a local landfill in South Africa*. Proceedings of the 2017 International Symposium on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM) Bristol, UK; 2017.
94. Goel B, Pant D, Kishore V. Two-phase anaerobic digestion of spent tea leaves for biogas and manure generation. *Bioresource technology*. 2001;80(2):153–6.
95. Thanarasu A, Periyasamy K, Devaraj K, Periyaraman P, Palaniyandi S, Subramanian S. Tea powder waste as a potential co-substrate for enhancing the methane production in anaerobic digestion of carbon-rich organic waste. *Journal of Cleaner Production*. 2018;199:651–8.
96. Khayum N, Anbarasu S, Murugan S. Biogas potential from spent tea waste: A laboratory scale investigation of co-digestion with cow manure. *Energy*. 2018;165:760–8.
97. Abe MM, Martins JR, Sanvezzo PB, Macedo JV, Branciforti MC, Halley P, et al. Advantages and disadvantages of bioplastics production from starch and lignocellulosic components. *Polymers*. 2021;13(15):248.٤
98. Jamróz E, Tkaczewska J, Kopeć M, Cholewa-Wójcik A. Shelf-life extension of salmon using active total biodegradable packaging with tea ground waste and furcellaran-CMC double-layered films. *Food chemistry*. 2022;383:132425.

99. Liu M, Arshadi M, Javi F, Lawrence P, Davachi SM, Abbaspourrad A. Green and facile preparation of hydrophobic bioplastics from tea waste. *Journal of Cleaner Production*. 2020;276:123353.
100. Karthäuser J, Biziks V, Mai C, Militz H. Lignin and lignin-derived compounds for wood applications—A review. *Molecules*. 2021;26(9):2533.
101. Xia G, Ji X, Xu Z, Ji X. Transparent cellulose-based bio-hybrid films with enhanced anti-ultraviolet, antioxidant and antibacterial performance. *Carbohydrate Polymers*. 2022;298:120118.
102. Shen Y, Seidi F, Ahmad M, Liu Y, Saeb MR, Akbari A, et al. Recent advances in functional cellulose-based films with antimicrobial and antioxidant properties for food packaging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2023;71(44):16469–87.
103. Shan P, Wang K, Yu F, Yi L, Sun L, Li H. Gelatin/sodium alginate multilayer composite film crosslinked with green tea extract for active food packaging application. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023;662:131013.
104. Quintero-Borregales LM, Vergara-Rubio A, Santos A, Famá L, Goyanes S. Black tea extracts/polyvinyl alcohol active nanofibers electrospun mats with sustained release of polyphenols for food packaging applications. *Polymers*. 2023;15(5):1311.
105. Sethulakshmi A, Saravanakumar M. Sustainable papaya plant waste and green tea residue composite films integrated with starch and gelatin for active food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;260:129153.
106. Dutta M, Das U, Mondal S, Bhattacharya S, Khatun R, Bagal R. Adsorption of acetaminophen by using tea waste derived activated carbon. *International Journal of Environmental Sciences*. 2015;6(2):270–81.
107. He X, Li J, Meng Q, Guo Z, Zhang H, Liu Y. Enhanced adsorption capacity of sulfadiazine on tea waste biochar from aqueous solutions by the two-step sintering method without corrosive activator. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(1):104898.
108. Guardia L, Suarez L, Querejeta N, Rodriguez Madrera R, Suarez B, Centeno TA. Apple waste: a sustainable source of carbon materials and valuable compounds. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019;7(20):17335–43.
109. Arie AA, Kristianto H, Cengiz EC, Demir-Cakan R. Waste tea-based porous carbon–sulfur composite cathodes for lithium–sulfur battery. *Ionic*. 2020;26(1):201–12.
110. Song X, Ma X, Li Y, Ding L, Jiang R. Tea waste derived microporous active carbon with enhanced double-layer supercapacitor behaviors. *Applied Surface Science*. 2019;487:189–97.
111. Ratnaji T, Kennedy LJ. Hierarchical porous carbon derived from tea waste for energy storage applications: Waste to worth. *Diamond and Related Materials*. 2020;110:108100.
112. Srivastava N, Pal N, Agarwal M, Dohare RK. Investigation of the performance of metal-free catalyst prepared from black tea and green tea waste for hydrogen production via methanolysis of sodium borohydride and optimization using response surface methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(92):35919–37.
113. Jia T, Han F, Zhang R, Zhao M, Chen Z, Wang Z, et al. Biomass photothermal hydrogel based on tea leaves residue for cogeneration of clean water and electricity. *Advanced Sustainable Systems*. 2024;8(6):2300531.
114. Kaya M, Tabak A. Recycling of an agricultural bio-waste as a novel cellulose aerogel: a green chemistry study. *Journal of Polymers and the Environment*. 2020;28(1):323–30.
115. Tin NT, Huyen NTT, Tu PM, Minh PPD, Nam NTH, Cong CQ, et al. Facile fabrication of carbon aerogel by cellulose extracted from tea grounds and carboxymethyl cellulose for adsorption and energy storage applications. *Materials Letters*. 2023;342:134304.
116. Li J, Liu M, Luo W, Xing G, Yang W, Sun H, et al. 3D tea-residue microcrystalline cellulose aerogel with aligned channels for solar-driven interfacial evaporation cogeneration. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023;15(44):51979–88.
117. Nie L, Chang P, Liang S, Hu K, Hua D, Liu S, et al. Polyphenol rich green tea waste hydrogel for removal of copper and chromium ions from aqueous solution. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021;4:100167.
118. Nille OS, Patil AS, Vibhute AA, Shendage SS, Tiwari AP, Anbhule PV, et al.

- Route-dependent tailoring of carbon dot release in alginate hydrogel beads (HB-Alg@WTR-CDs): A versatile platform for biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;257:128126.
119. Gao W, Chen F, Wang X, Meng Q. Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020;19(4):2222–55.
120. Kaur H, Jaryal N. Utilization of biogenic tea waste silver nanoparticles for the reduction of organic dyes. *Materials Research Express*. 2018;5(5):055402.
121. Wang T, Lin J, Chen Z, Megharaj M, Naidu R. Green synthesized iron nanoparticles by green tea and eucalyptus leaves extracts used for removal of nitrate in aqueous solution. *Journal of cleaner production*. 2014;83:413–9.
122. Shivaji K, Balasubramanian MG, Devadoss A, Asokan V, De Castro CS, Davies ML, et al. Utilization of waste tea leaves as bio-surfactant in CdS quantum dots synthesis and their cytotoxicity effect in breast cancer cells. *Applied Surface Science*. 2019;487:159–70.
123. Prema P, Veeramanikandan V, Rameshkumar K, Gatasheh MK, Hatamleh AA, Balasubramani R, et al. Statistical optimization of silver nanoparticle synthesis by green tea extract and its efficacy on colorimetric detection of mercury from industrial waste water. *Environmental Research*. 2022;204:111915.
124. Gunjal DB, Naik VM, Waghmare RD, Patil CS, Shejwal RV, Gore AH, et al. Sustainable carbon nanodots synthesised from kitchen derived waste tea residue for highly selective fluorimetric recognition of free chlorine in acidic water: A waste utilization approach. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2019;95:147–54.
125. Hu C, Lin T-J, Huang Y-C, Chen Y-Y, Wang K-H, Lin K-YA. Photoluminescence quenching of thermally treated waste-derived carbon dots for selective metal ion sensing. *Environmental Research*. 2021;197:111008.
126. Shaikh WA, Kumar A, Chakraborty S, Islam RU, Bhattacharya T, Biswas JK. Biochar-based nanocomposite from waste tea leaf for toxic dye removal: From facile fabrication to functional fitness. *Chemosphere*. 2022;291:132788.