Journal of Textiles and Polymers

Vol. 12, No. 2, 23-49, April 2024
https://www.itast.ir
DOI: https://doi.org/10.48302/jtp.2025.498004.1303

Face Masks: From the Coronavirus Crisis and Environmental Challenges to Recycling Opportunities

Navid Rabiei [1*], Mohammad Haghighat kish [1]

[1] Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Article Information

Article history:

Received: 2025-01-05
Accepted: 2025-07-10

***Keywords*:**

Corona, Covid 19, Facemask, Waste, Recycling, Plastic.

Abstract

The COVID-19 pandemic, from 2019 to late 2021, caused a substantial rise in contaminated medical waste, largely due to increased use of personal protective equipment (PPE), particularly face masks. Despite a recent decline in general use due to the disease becoming endemic and worsening air pollution, waste generation remains high, especially in hospitals. This contaminated waste poses significant risks to human societies and the environment. Pathogenic viruses can survive on these materials, spreading disease through human contact. Additionally, face masks, predominantly made from non-biodegradable polymers, persist in the environment, gradually breaking down into microplastics, nanoplastics, and microfibers. These particles disperse into oceans, rivers, and soil, entering the food chain and disrupting aquatic, terrestrial, and atmospheric ecosystems. In response to these environmental and health challenges, extensive research worldwide aims to find effective waste management solutions. Various review articles and strategies have been proposed. This paper explores the link between face masks and environmental sustainability. It then delves into research on polymer recycling and methods for repurposing face masks into value-added products. This includes examining the potential for fuel production from masks, their application in construction materials like concrete and asphalt, and the feasibility of incorporating them into a circular economy to minimize waste. Finally, the paper will summarize the content, address current limitations and challenges, and offer suggestions for future research directions.

[*] Coresponding author: nrabiei@aut.ac.ir

نشریه نساجی و پلیمر

سال ۱۲، شماره ۲، ۴۹-۲۳، بهار ۱۴۰۳

https://www.itast.ir

DOI: https://doi.org/10.48302/jtp.2024.415172.1273

پنام‌ها (ماسک‌ها):

از بحران کرونا و چالش‌های زیست‌محیطی تا فرصت‌های بازیافت

نوید ربیعی[1*]، محمد حقیقت کیش[1]

۱- دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹

واژه‌های کلیدی:

کرونا (کووید ۱۹)، پنام ، پلاستیک، پسماند، بازیابی.

چکیده

همه‌گیری کووید-۱۹، از ۱۳۹۸ تا اواخر ۱۴۰۱ خورشیدی، منجر به افزایش چشم‌گیری در تولید زباله‌های پزشکی آلوده شد. این افزایش مستقیماً با افزایش استفاده از تجهیزات حفاظت فردی، به‌ویژه پنام‌ها (ماسک‌ها)، مرتبط بود. با وجود کاهش اخیر در استفاده عمومی به دلیل بومی شدن این بیماری و افزایش آلودگی هوا، به نظر می‌رسد تولید این زباله‌ها همچنان بالا است که خطرات متعددی برای جوامع انسانی و محیط زیست ایجاد می‌کنند. ویروس‌های بیماری‌زا می‌توانند بر روی این مواد، زنده بمانند و از طریق تماس انسانی بیماری را گسترش دهند. علاوه بر این، پنام‌ها، عمدتاً از پلیمرهای غیرقابل تجزیه زیستی ساخته شده‌اند، در محیط باقی می‌مانند و به‌تدریج به میکروپلاستیک‌ها، نانوپلاستیک‌ها و میکرولیف‌ها تجزیه می‌شوند. این ذرات به راحتی در اقیانوس‌ها، رودخانه‌ها و خاک پخش می‌شوند و در نهایت وارد زنجیره غذایی می‌شوند و به شدت اکوسیستم‌های آبی، زمینی و جوی را مختل می‌کنند. در پاسخ به این چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی، تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در سراسر جهان برای یافتن راهکارهای مدیریت پسماند انجام شده است. مقالات مروری متعددی منتشر شده و راهکارهای گوناگونی پیشنهاد شده است. این مقاله به بررسی مسئله پنام‌ها و ارتباط آنها با پایداری زیست‌محیطی می‌پردازد. سپس، بر تحقیقات در زمینه بازیافت پلیمر و روش‌های استفاده مجدد از پنام‌ها برای تولید محصولات با ارزش افزوده تمرکز می‌کند. این شامل بررسی تولید سوخت از پنام‌ها، کاربرد آنها در ساخت و ساز مانند بتن و آسفالت و امکان استفاده از آنها در یک اقتصاد دایره‌ای برای به حداقل رساندن ضایعات است. در پایان، این مقاله به کمبودها و چالش ها می‌پردازد و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌دهد.

۱ مقدمه

واژۀ "ماسک" در زبان انگلیسی دارای معانی زیادی است، اما در زبان فارسیِ امروز، این کلمه بیشتر به پارچه یا قالبی گفته می‌شود که برای پوشاندن بینی و دهان به کار می‌رود. با این حال، استفاده از ماسک به زمان‌های بسیار دور بازمی‌شود و ریشه‌های تاریخی عمیقی دارد. در فرهنگ لغت دهخدا [۱]، به عنوان یکی از منابع معتبر زبان فارسی، دربارۀ ماسک چنین آمده است: "به لغت زند و پازند پارچه‌ای باشد چهارگوشه که در دو گوشه آن دو بند دوزند و متابعان زردشت در وقت خواندن زند و پازند و اوستا آن را بر روی خود بندند ... و بەواسطه آنکه روی را پوشیده می‌دارد، پنام نامیده می‌شود." این تعریف نشان می‌دهد که ماسک در ابتدا نه صرفاً یک وسیلۀ محافظتی، بلکه یک پوشش آیینی و مذهبی بوده است. شکل ۱ تصویری از جشن سده کرمان در سال ۱۴۰۳ است که بکارگیری پنام را به خوبی نشان می‌دهد. پس از این دوران، حدود ۴۰۰ سال قبل از میلاد، بقراط، پزشک مشهور یونانی، پیشنهاد کرد که گرد و غبار معادن سمی است و معدن‌کاران باید از خود در برابر آن محافظت کنند. بر این اساس، معدن‌کاران رومی از نوعی پنام (ماسک) برای جلوگیری از مسمومیت استفاده می‌کردند [۲]. این کاربرد، نشان‌دهندۀ تحول کارکرد ماسک از یک پوشش مذهبی به یک وسیلۀ محافظتی در برابر خطرات محیطی است.

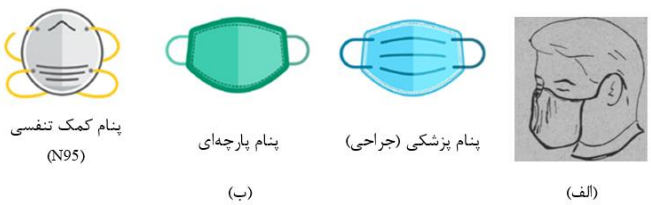
شکل ۱ استفاده از پنام در مراسم جشن سده‌ی زرتشتیان در کرمان (عکس از شاهرخ قاضی‌گری - برساد، تارنمای خبری تحلیلی زرتشتیان، بهمن‌ماهِ ۱۴۰۳)

*نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: nrabiei@aut.ac.ir

مطالعات پیوسته و مستند در زمینهٔ پنام‌های پزشکی، از حوالی سال ۱۸۵۰ میلادی (۱۲۲۹ شمسی) آغاز شده است [۳]. با این حال، در چند سال اخیر و به دنبال شیوع بیماری کرونا در جهان، این موضوع به دغدغه‌ای گسترده و بسیار جدی در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی تبدیل شده است. در اوایل دی‌ماه ۱۳۹۸، بیماری همه‌گیر کرونا در ووهان چین ظهور کرد. در آن زمان، قرنطینه کردن بیماران، رعایت فاصلهٔ اجتماعی و استفاده از وسایل محافظتی مانند پنام‌ها، به عنوان تنها راهکارهای کاهش شدت شیوع بیماری در میان مردم شناخته می‌شد.

دیری نپایید که تحقیقات در زمینهٔ پنام‌های پزشکی، ابعاد گسترده‌تری به خود گرفت. از یک سو، پزشکان و پژوهشگران حوزهٔ سلامت، با توجه به وسعت شاخه‌های پزشکی، از دیدگاه‌های گوناگون به این موضوع پرداختند. از سوی دیگر، مهندسان و فیزیک‌دانان، به بررسی تأثیرات متقابل پنام‌ها با جریان هوا و هواویزه‌ها پرداختند. این تحقیقات منجر به شکل‌گیری شاخهٔ علمی مستقلی به نام "هواویزه‌ها" شده است. موضوع هواویزه‌ها و جداسازی آن‌ها از هوا را می‌توان در منابع ارزشمندی [۲، ۴-۷] جستجو کرد. مقالات متعددی نیز به جنبه‌های تخصصی این حوزه پرداخته‌اند [۸-۱۲]. علاوه بر این، روش ساخت و فناوری تولید پنام و فیلتر آن، خود به بخش مجزایی با الزامات تخصصی تبدیل شده است. به طور خاص، مواد مورد استفاده، روش‌های آزمایش، فرآیند تولید و جنبه‌های گوناگون پنام‌های مورد استفاده برای محافظت در برابر کرونا، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است [۱۲].

همگام با پیشرفت تحقیقات علمی و با در نظر گرفتن نیازهای جوامع، قیمت تمام‌شده، امکانات موجود و فناوری‌های تولیدی، انواع پنام‌ها با اشکال گوناگون در دسترس مصرف‌کنندگان قرار گرفته است. شکل ۲ نمونه‌هایی از این پنام‌ها را نشان می‌دهد. در این میان، تولیدکنندگان بیشتر بر بازده و کیفیت پنام‌ها تمرکز داشته‌اند. بازده پنام، توانایی آن در حذف ذرات از هوا و نگهداری آن‌ها را نشان می‌دهد. این پارامتر به صورت نسبت اختلاف غلظت ذرات ورودی و خروجی به غلظت ذرات ورودی تعریف می‌شود. مقدار بازده، شاخصی برای ارزیابی کارکرد هر فیلتر یا صافی است. نسبت فشار هوا در محیط خروجی به فشار هوای محیط ورودی نیز عامل مهمی در تعیین کیفیت پنام محسوب می‌شود. کیفیت یک صافی یا پنام با ضریب کیفیت آن سنجیده می‌شود که به صورت نسبت بازده به مقدار کاهش فشار تعریف شده است [۱۱]. در ارزیابی پنام‌ها، ممکن است از استانداردهای مختلفی استفاده شود. در این استانداردها، به پنج ویژگی اصلی شامل بازده ذرات، بازده باکتری‌ها، مقاومت در برابر عبور مایعات، اختلاف فشار و قابلیت اشتعال توجه می‌شود [۱۱، ۱۲].



شکل ۲ الف: شکل ظاهری پنام مورداستفاده در سال‌های ۱۹۶۰ میلادی [۳] و ب: شکل نمونه‌هایی از پنام‌های متداولِ کنونی

پس از اجباری شدن استفاده از پنام در برخی کشورها و افزایش چشمگیر مصرف آن، به موازات کمبود تولید، مسائل متعددی مطرح شد. ابتدا، استفاده مکرر از یک پنام، سپس دوخت دستی یا ساخت پنام از پارچه‌های مستعمل خانگی و در نهایت، موضوع بازیافت و آلودگی محیط زیست به پلیمرهایی که به سرعت کافی تجزیه نمی‌شوند، در موسسات تحقیقاتی فعال در حوزه محیط زیست به بحث گذاشته شد.

در این مقاله، ابتدا به هشدارهای محققان در سراسر جهان و مسئله بازیابی پلیمرها، که موضوعی قدیمی و شناخته شده است، اشاره می‌شود. سپس، در چند بخش، به بررسی ارتباط بین پنام‌ها و محیط زیست و همچنین میکرو-نانوپلاستیک‌ها پرداخته می‌شود. هدف از این بررسی، نشان دادن ضرورت برنامه‌ریزی برای دفع صحیح پنام‌ها به عنوان زباله است. در غیر این صورت، و به دلیل مدیریت ناصحیح، آسیب‌های غیر قابل پیش بینی متعددی به محیط زیست و زندگی انسان‌ها وارد خواهد شد. در بخش‌های بعدی، راهکارهای مختلفی برای کاهش خطرات ذکر شده شرح داده می‌شود. این راهکارها شامل تولیدات متنوع پنام‌ها با قابلیت‌های گوناگون، استفاده از پنام‌ها برای تولید سوخت یا انرژی، استفاده مکرر از پنام‌ها با رعایت اصول بهداشتی، بازیابی مکانیکی پنام‌ها، و نهایتاً استفاده از پلیمرهای زیست تخریب پذیر است. این راهکارها به منظور نشان دادن امکان کاهش مضرات پنام‌ها مطرح شده‌اند. در بخش پایانی، به نتیجه‌گیری و پیشنهادها پرداخته شده است.

۲ بازیابی پلیمرها

بیش از ۷۴ سال پیش، تولید انبوه پلیمرهای مصنوعی دیرتخریب‌پذیر آغاز شد. تولید جهانی الیاف و رزین‌ها در سال ۱۹۵۰، دو میلیون تن بود، اما تا سال ۲۰۱۷ میلادی، به حدود ۸۳۰۰ میلیون تن مواد پلاستیکی خام افزایش یافت که از این میزان، ۶۳۰۰ میلیون تن آن به ضایعات تبدیل شده است. بر اساس پیش‌بینی‌ها، انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰، میزان ضایعات و مواد دورریز دفن شده به ۱۲۰۰۰ میلیون تن برسد [۱۳]. در سال ۲۰۲۰ میلادی، در مقاله‌ای که توسط ده متخصص تدوین و منتشر شد، بر اساس مستندات اعلام گردید که رشد فزاینده ضایعات پلاستیکی، بحرانی جدی برای آب دریاها و آب‌های شیرین در سطح جهانی (۱۷۳ کشور) ایجاد خواهد کرد [۱۴].

از همان آغاز تولید انبوه پلیمرهای مصنوعی، بازگردانی، بازیافت و استفاده مجدد از محصولاتی که مشخصات قابل قبول را نداشتند، مطرح شد و تلاش‌هایی برای یافتن راهکارهای اقتصادی بهینه صورت گرفت. پس از آن، موضوع مشکلات زیست‌محیطی ناشی از محصولات پلیمری مصرف شده و دفع شده به میان آمد. بررسی‌ها نشان داده است که تولیدات، بدون تدبیر لازم، صرفاً به صورت زباله نامطلوب دفع می‌گردند. زباله‌های تولید شده نه تنها در خشکی‌های زمین باقی می‌مانند، بلکه از طریق رودخانه‌ها به دریاها و اقیانوس‌ها نیز منتقل می‌شوند [۱۴]. بیشتر تولیدات پلیمری در محیط به سرعت به مواد بی‌ضرر برای محیط زیست تخریب نمی‌شوند و بیش از ۳۵۰ سال در محیط باقی می‌مانند. وقتی پلاستیک‌ها در محیط باقی می‌مانند به

تدریج شکسته و خرد می‌شوند و به میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها، با ابعادی در حدود چند نانومتر تا چند میلی‌متر، تبدیل می‌گردند.

برای کاهش زباله‌های پلیمری، راهکارهای متفاوتی مطرح شده است؛ یا باید تولیدات محدود گردند، یا با یکی از روش‌های سوزاندن، نوری، یا بیولوژیکی تخریب شوند، یا از طریق بازیافت، مجدداً مورد استفاده قرار گیرند [۱۲-۲۰]. هر یک از این روش‌ها دارای معایب و مزیت‌هایی است که در مقالات متفاوتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۵]. مقاله مروری دیگری که روش‌های شیمیایی بازیافت پلاستیک‌ها را (غیر از روش معمول خرد کردن، ذوب کردن و روزن‌رانی مجدد) شرح داده است، اشاره می‌کند که ضایعات پلاستیکی بالغ بر سالیانه ۲۶۰ مگا تن است [۱۶]. روش‌های بازیابی شیمیایی پلیمرها در مقاله دیگری شرح داده شده است و برای پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن که بیشتر در پنام‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، بر روش حرارتی-شیمیایی برای تبدیل آن‌ها به سوخت مایع تأکید شده است [۱۷].

موضوع "اقتصاد دایره‌ای" در مقابل "اقتصاد خطی" و "اقتصاد بازیابی" پلیمرها مورد توجه قرار گرفته است. در اقتصاد خطی، مواد اولیه به محصول تبدیل می‌شود و محصول پس از استفاده به صورت زباله از محیط معمول زندگی خارج می‌شود و در جایی مدفون یا سوزانده می‌شود. در "اقتصاد بازیابی"، محصول پس از کاربرد دوباره بازیابی شده و پس از استفاده مجدد به صورت ضایعات از محیط خارج می‌شود. لیکن، در اقتصاد دایره‌ای هیچ ضایعاتی از محیط خارج نمی‌شود، بلکه مواد مدام مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۸].

برای بازیافت پلیمرها، محققین به نتایج مطلوبی دست یافته‌اند. با این حال، به نظر می‌رسد هنوز نقصان‌هایی وجود دارد که باید برطرف گردند. در اینجا تنها به یک مورد تازه انتشار یافته که درباره استفاده از کاتالیزور و حلال مناسب برای شکستن مولکول‌های زنجیری پلی‌اتیلن ترفتالات است اشاره می‌شود، که صرفاً نمونه‌ای از تعداد بسیار زیادی تحقیقات مداوم در این زمینه است [۱۹].

۳ پنام‌ها و پایداری محیط زیست

پلاستیک‌ها در پزشکی کاربردهای مفید و حتی برخی از آن‌ها کاربردهای حیاتی دارند. با این حال، آلوده شدن محیط‌زیست به پسماندها موضوعی است که مورد توجه بسیاری قرار گرفته است و به صورت‌های متفاوتی در مقالات متعدد مرور شده است. برخی، راهکارهایی را برای کاهش یا مدیریت صحیح آن‌ها بیان کرده‌اند. تعداد این مقالات مروری قابل توجه است و پاره‌ای نیز با استفاده از مرورگرهای جستجوی رایانه‌ای تدوین شده‌اند. اغلبِ مقالاتی که در دسترس قرار گرفته‌اند دارای موضوعات کلیدی تکراری هستند. در این بخش تنها به تعداد معدودی از آن‌ها اشاره می‌شود. تعداد مقالات تحقیقاتی تجربی و نظری در دوره شیوع کرونا، شاید به دلیل محدودیت زمانی و تعطیلات اجباری، کمتر منتشر شده است.

بسیاری معتقدند در حالی که پنام‌ها در جلوگیری از انتشار ویروس بسیار مؤثرند، با مدیریت بجا و صحیح پسماندها می‌توان از تأثیرات مخرب تمام وسایل محافظتی بر محیط‌زیست تا حد قابل توجهی کاست [۲۰-۲۱]. در کشورهای در حال توسعه، عدم مدیریت صحیح پسماندها انتشار بیماری را تشدید می‌کند [۲۲]. برخی دیگر معتقدند که تأثیرات میکروپلاستیک‌ها بر سلامت انسان به صورت مستقیم و مدلل به ندرت آزمایش شده است و بیشتر استنتاج‌ها از مدل‌های آزمایشی است و تحقیقات دقیق‌تری مورد نیاز است [۲۳]. در مبارزه با کووید-۱۹، محافظ‌های شخصی شامل عینک، پیراهن، پنام، دستکش و غیره نیز مورد توجه قرار گرفته است [۲۴]. با توجه به مشکلات به وجود آمده برای مدیریت صحیح ضایعات حاصل از محافظ‌های فردی، پیشنهاد شده است که از مواد اولیه تجدیدپذیر یا بی‌اثر بر محیط‌زیست برای تولید پنام‌ها استفاده شود [۲۵]. شیوع بیماری کرونا موجب شد که پسماندهای آلوده به شدت افزایش یابند، در نتیجه در مدیریت پسماندها باید این افزایش و انتشار آلودگی در نظر گرفته شود. کاهش ضایعات و دورریزها و استفاده پایدار، نیاز به آموزش مصرف‌کنندگان و اعتقاد دولتمردان دارد [۲۶-۲۸].

افزایش ضایعات زیست‌پزشکی در زمان موج اول و دوم شیوع کرونا در هندوستان، منجر به افزایش مواد آلوده‌کننده هوا در اثر سوزاندن این ضایعات شد. ارزیابی میزان این مواد نشان داد که ترکیب‌های خروجی دودکش‌های محل سوزاندن زباله‌ها حاوی فلزات خطرناک از جمله سرب با بیشترین مقدار و کادمیوم، که عامل بروز سرطان در بزرگسالان است، می‌باشد [۲۹]. به گفته موهانتی [۳۰]، مصرف پنام در جهان به ۱۲۹ میلیارد عدد در ماه رسیده است. این پژوهشگر در یک مقاله مروری مفصل، اهمیت، مشکلات، آمار تولید و همچنین راهکارهایی را برای دورریز صحیح و نهایتاً استفاده از پنام‌های مصرف شده ارائه کرده است [۳۰].

محققان به منظور یافتن راهکارهای موثر برای کاهش آلودگی محیط زیست، به بررسی رفتار انسان‌ها در قبال پنام‌ها پرداخته‌اند. در دانشگاه سانتو توماس (فیلیپین)، پژوهشی انجام شده است که به بررسی نحوه برخورد کارکنان و دانشجویان با سه نوع مختلف پنام می‌پردازد و نتایج آن به صورت آماری تحلیل شده است. تجزیه و تحلیل این نتایج نشان داد که دولت‌ها باید برنامه‌هایی را برای آموزش و آگاهی‌رسانی به مصرف‌کنندگان در مورد نحوه صحیح مصرف و دفع پنام‌ها اجرا کنند [۳۱].

در یک مطالعه دیگر، نحوه دور انداختن پنام‌ها توسط افراد در سواحل ماهیگیری، اماکن تفریحی و خیابان‌های شهری منطقه کورماندل در جنوب هندوستان مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، میزان پنام‌های دور ریخته شده و نظرات ساکنان در ۱۶ ایستگاه به مدت چهار هفته جمع‌آوری شده است. نتایج نشان داد که بیشتر افراد به دلیل سهولت استفاده و قیمت پایین، تمایل به استفاده از پنام‌های یکبار مصرف دارند و بسیاری از آن‌ها پنام‌های استفاده شده را به همراه سایر زباله‌ها دفع می‌کنند. برای جلوگیری

از آلودگی محیط زیست، بیشتر افراد بر این باور بودند که باید ظروف دربسته مخصوص جمع‌آوری پنام‌ها در مکان‌های عمومی قرار داده شود [۳۲].

به دلیل فوریت‌های پزشکی ناشی از همه‌گیری کرونا، ملاحظات زیست‌محیطی در سیاست‌گذاری‌ها نادیده گرفته شد. برای حفظ محیط زیست، نیاز به نوآوری‌های اساسی و توجه جدی سیاست‌گذاران وجود دارد [۳۳]. پلاستیک‌هایی که در مقابله با کرونا استفاده می‌شوند، از جمله پنام‌ها، هم دارای مزایا و هم معایبی هستند. با مدیریت صحیح پسماندها می‌توان از آثار مخرب آن‌ها کاست [۳۴]. همکاری و هماهنگی میان مراکز بهداشتی و شرکت‌های بازیافت‌کننده پلیمرها برای مدیریت بهینه پسماندهای بهداشتی ضروری است [۳۵]. شیوع بیماری، آثار مثبتی نیز داشته است، مانند کاهش آلودگی هوای شهرها به دلیل کاهش فعالیت‌ها، کاهش آلودگی صوتی و کاهش آلودگی آب‌ها. با این حال، لازم است که جنبه‌های مثبت و منفی به‌طور همزمان مورد توجه قرار گیرند [۳۶]. در ابتدا نشان داده شد که چگونه ضایعات ناشی از همه‌گیری، باعث شکل‌گیری تحقیقات می‌شود. در نهایت، لازم است تحقیقات در زمینه سلامت با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از پسماندها، مجدداً سازماندهی شود [۳۷]. ملک‌پور و همکاران در بررسی خود در مورد نبرد جهانی با کووید-۱۹، فناوری نانو، پلیمرها، چاپ سه‌بعدی و افزودنی‌ها را مرور کرده و به اثرات زیست‌محیطی، چه مثبت و چه منفی آن‌ها نیز توجه داشته‌اند [۳۸].

دارماراج پنام‌های مورد استفاده را به سه گروه اصلی تقسیم کرده است [۳۹]: گروه اول، پنام‌های جراحی یا پزشکی؛ گروه دوم، پنام‌های کمک تنفسی N95وFFP2؛ و گروه سوم، پنام‌های پارچه‌ای. پنام‌های جراحی یا پزشکی که بیشتر توسط پزشکان و کارکنان بخش‌های بهداشتی و درمانی در بیمارستان‌ها استفاده می‌شوند، اغلب از سه لایه تشکیل شده‌اند. لایه خارجی از پارچه بی‌بافت ضد آب ساخته شده است که ترشحات بیمار را مهار می‌کند و از نفوذ آن‌ها به داخل پنام جلوگیری می‌کند. لایه درونی جاذب رطوبت است و لایه میانی که معمولاً به روش مذاب‌افشانی تولید می‌شود، نقش فیلتر و صافی را ایفا می‌کند و از ورود میکروب‌ها جلوگیری می‌کند. پنام‌های جراحی یا پزشکی بیشتر برای محافظت از بیمار در برابر ترشحات فرد استفاده کننده طراحی شده‌اند و مدت زمان استفاده پیشنهاد شده از آن‌ها کمتر از دو ساعت و نیم است. پلیمرهای اصلی مورد استفاده در این نوع پنام‌ها، پلی‌پروپیلن است. با این حال، پلیمرهای دیگری مانند پلی‌استایرن، پلی‌استر، پلی‌کربنات و پلی‌اتیلن نیز در ساخت آن‌ها به کار می‌روند. به طور کلی، در مباحث نظری، مکانیسم‌های جداسازی ذرات شامل نفوذ براونی، گیر افتادن، برخورد اینرسی، رسوب به دلیل نیروی جاذبه و جذب الکترواستاتیکی هستند که در ساختار فیلتر پنام‌ها برای جلوگیری از نفوذ ذرات استفاده می شود.

پنام‌های N95 از ورود باکتری‌ها و هواویزه‌های مضر و ذرات معلق هوازاد کوچک‌تر از ۰/۳ میکرومتر به دهان و بینی فرد استفاده‌کننده جلوگیری می‌کنند. این پنام‌ها یک‌بار مصرف هستند. پنام‌های پارچه‌ای به دلیل کمبود پنام‌های N95 و پنام‌های پزشکی و جراحی، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پنام‌های پارچه‌ای که از سه لایه ساخته شده‌اند و دارای یک لایه میانی به منظور جلوگیری از نفوذ هواویزه‌ها هستند، مورد تأیید سازمان جهانی بهداشت قرار گرفته‌اند. برای جذب گازها و ذرات کوچک‌تر از ۲/۵ میکرومتر، ممکن است از مواد مختلفی مانند کربن فعال یا ترکیبات نیکل استفاده شود. اغلب پنام‌ها از پلیمرهایی ساخته شده‌اند که برای مدت طولانی در محیط باقی می‌مانند و به میکروپلاستیک‌ها تبدیل می‌شوند. به منظور حفظ محیط زیست، تلاش‌هایی برای استفاده از پلیمرهای زیست‌سازگار در تولید پنام‌ها در حال انجام است. میکروپلاستیک‌ها، به ویژه در محیط‌های زیست دریایی، به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ذرات که اندازه‌هایی از میلی‌متر تا نانومتر دارند، به محیط زیست و موجودات دریایی آسیب می‌رسانند [۳۹].

در بحبوحه شیوع بیماری مسری کرونا، بحث و جدل پیرامون آثار مفید بهداشتی پنام‌ها در برابر آثار مضر آلودگی محیط زیست ناشی از پلاستیک‌های به‌کاررفته در آن‌ها، ابعاد گسترده‌تری پیدا کرده است. در این میان، علاوه بر آموزش و اطلاع‌رسانی همگانی، توجه به زیرساخت‌های لازم نیز اهمیت یافته است [۴۰]. همه‌گیری کووید-۱۹ مشکلات مربوط به ضایعات پلاستیکی را تشدید کرد. یکی از راهکارهای پیشنهادی که مورد بحث و بررسی قرار گرفته، بازیابی پلیمرهای به‌کاررفته در پنام‌ها و استفاده مجدد از آن‌ها است [۴۱].

مسئله ضایعات ناشی از وسایل محافظتی در برابر کرونا، یک چالش جهانی است. تجزیه این وسایل محافظت شخصی در محیط زیست به میکروپلاستیک‌ها، که سلامت حیوانات و انسان‌ها را به خطر می‌اندازد، نیازمند توجه جدی است. لازم است تحقیقات برای یافتن مدل‌های آزمایشگاهی مناسب جهت تعیین سمیت پلاستیک‌ها و میکروپلاستیک‌ها ادامه یابد [۴۲]. از آنجایی که ویروس کرونا می‌تواند تا چند روز بر روی سطوح پنام باقی بماند و به افراد سالم منتقل شود، توجه به روش‌های دفع اصولی این ضایعات به‌گونه‌ای که از تماس انسان با آن‌ها جلوگیری شود، ضروری است. در کشورهای در حال توسعه آفریقایی (مانند آفریقای جنوبی، مصر، کنگو و غیره) اگرچه به شیوع بیماری‌های مسری توجه شده است، اما لازم است برای دفع زباله‌ها روش‌های مناسبی اتخاذ شود [۴۳]. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که پنام‌های استفاده شده، محیط مناسبی برای تجمع ژن‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک‌ها فراهم می‌کنند [۴۴].

در یک پژوهش، نمونه‌های قوطی‌های شفاف پلی‌اتیلن که در رستوران‌ها برای ارائه غذا استفاده می‌شوند و پنام‌های پلی‌اتیلنی یک‌بارمصرف در محیط آزمایشگاهی مناسب قرار گرفتند تا لایه‌ای روی آن‌ها تشکیل شود. این لایه در واقع یک بیوفیلم بود (لایه‌ای متشکل از انباشت باکتری‌ها و میکروب‌ها). در اثر تفاوت در ساختار سطحی قوطی و پارچه بی‌بافت پنام، مشاهده شد که بیوفیلم‌های تشکیل‌شده روی پنام‌ها و قوطی‌ها متفاوت هستند. بر روی پنام‌ها مقدار بیشتری از ماده‌ای مانند تریپتوفان تشکیل شده بود. در نتیجه، به نظر می‌رسد که تأثیر آن‌ها بر محیط زیست متفاوت خواهد بود [۴۵].

۳-۱ مدیریتِ پسماندِ پنام‌ها در کشورهای مختلف

محققان در سراسر جهان اذعان دارند که آلودگی محیط زیست ناشی از وسایل محافظت شخصی، به ویژه پنام‌های مصرف شده در دوران همه‌گیری کرونا،

به طور چشمگیری افزایش یافته است [۴۶-۹۱]. با بررسی داده‌های موجود در پایگاه‌های اطلاعاتی نظیر Web of Science و Scopus، راهکارهای مدیریت پسماندهای حاصل از این افزایش در کشورهای مختلف تحلیل شده و روش‌های بهینه برای مدیریت پسماندها پیشنهاد گردیده است. در برخی از کشورها، پسماندهای مربوط به بیماران مبتلا به کووید-۱۹ دسته‌بندی شده و با رعایت دستورالعمل‌های سازمان جهانی بهداشت، روش‌هایی برای دفع ایمن آنها به کار گرفته شده است. نخستین گام در این فرآیند، ضدعفونی کردن پنام‌ها در محل تولید است تا از انتقال بیماری به افرادی که مسئول جمع‌آوری پسماند هستند، جلوگیری شود [۴۶].

موضوع همه‌گیری غیرمنتظره کووید-۱۹، از زمان ظهور تا توسعه واکسن و سپس تقویت اثر واکسیناسیون با استفاده از پنام‌های یک‌بارمصرف، و همچنین راهکارهای کاهش اثرات منفی این بیماری با رویکردی جهانی، به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش آینده‌نگری، بر راهکارهای استفاده از پلیمرهای زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر، تولید سطوح ضد ویروس و موارد مشابه تاکید شده است [۴۷]. تأثیر همه‌گیری کووید-۱۹ بر افزایش تولید، بازیابی و دفع پسماندها در سطح جهان مورد توجه قرار گرفته و میزان مصرف، به ترتیب بزرگی، برای قاره‌های آسیا، آفریقا، اروپا، آمریکای شمالی، آمریکای جنوبی و اقیانوسیه تخمین زده شده است. راهکارهای مدیریت پسماند در چند کشور آسیایی نیز مورد بحث قرار گرفته است [۴۸]. سیلوا و همکاران برآورد کرده‌اند که در سال اول همه‌گیری، حجم پسماندهای ناشی از پنام‌ها در جهان به ۵/۳ میلیون تن متریک رسیده است که نشان‌دهنده رشد ۵/۳ درصدی است. در صورت عدم مدیریت صحیح، دستیابی به اهداف پایداری محیط‌زیست سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۳۰ با چالش مواجه خواهد شد [۴۹]. ضمن بررسی اختلال در زنجیره تامین مواد و دفع پسماند در طول همه‌گیری، میزان درصد جمعیت شهری متمایل به استفاده و مصرف پنام در ۳۷ کشور، بر اساس جمعیت کشورها، مشخص شده است. نتایج، به طور خلاصه، برای ۱۵ کشور در جدول ۱ ارائه شده است. در این بررسی بین ۳۷ کشور، چین بیشترین و لهستان کمترین میزان مصرف را داشته‌اند، و ایران در رتبه سیزدهم قرار گرفته است. در ایران، روزانه ۵۱ میلیون پنام استفاده و سپس در محیط رها می‌شود. باید توجه داشت که این حجم عظیم از پلیمرها روزانه در زمین‌های کشاورزی، جوی‌های آب و مناطق مسکونی رها می‌شوند [۵۰]. یک نظرسنجی آنلاین در کشورهای استرالیا، آمریکا، انگلستان، سریلانکا، هندوستان و سنگاپور (در بازه زمانی جولای تا اوت ۲۰۲۰) نشان داد که ۸۰ درصد از شرکت‌کنندگان همواره از پنام استفاده می‌کرده‌اند و فقط یک درصد هرگز از آن استفاده نکرده‌اند. بر این اساس، افزایش پسماند تخمین زده شد و راهکارهایی برای کاهش آن پیشنهاد گردید. به عنوان مثال، در هندوستان، تولید پنام در هفته، بین ۹۲۸ تا ۴۶۴۰ میلیون عدد تخمین زده شد. این آمار تکان‌دهنده حاکی از تولید حداقل ۲۴۵۰ تا ۱۲۲۵۸ تن پلی‌پروپیلن در هفته بود [۵۱]. از آنجا که دفع نامناسب پنام‌ها منجر به آلودگی محیط زیست می‌شود، این عمل غیرقانونی بوده و دارای پیامدهای حقوقی است. جنبه‌های قانونی تخریب محیط زیست ناشی از پسماندهای پنام، با توجه به اسناد و قوانین موجود، مورد بحث قرار گرفته است [۵۲].

به اهمیت و اثرات زیان‌بار استفاده از پنام‌ها، چگونگی ساخت پلیمرهای مورد استفاده در آنها و انواع پارچه‌های به کار رفته در تولیدشان توجه شده است. پلیمرهای رایج مورد استفاده عبارتند از: پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌استر، پلی‌آکریلونیتریل، پلی‌کربنات، پلی‌یورتان و پلی‌استایرن. پارچه‌های مورد استفاده نیز به سه دسته بی‌بافت، بافته‌شده و تریکوبافی تقسیم می‌شوند. در این بررسی، به دستورالعمل‌ها و مقررات "مؤسسه راهکارهای محیط‌زیست جهانی" مرتبط با برنامه محیط‌زیست سازمان ملل، در زمینه مدیریت پسماند در زمان همه‌گیری اشاره شده است. برای کاهش حجم پسماندها، به استفاده از پنام‌های چند بار مصرف و تولید پنام از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر (مانند سلولز، پلی‌لاکتیک اسید و پروتئین) نیز توجه شده است [۵۳].

یک مطالعه کتابخانه‌ای ارزشمند، به بررسی گستردگی موضوع مدیریت پسماندها در زمان شیوع کووید-۱۹ در جهان پرداخته است. در این مطالعه، اطلاعات جامعی در مورد ابعاد مختلف این موضوع ارائه شده و نهایتاً هفت موضوع تحقیقاتی مشخص و مورد بحث قرار گرفته است. برای نشان دادن میزان فعالیت‌های علمی در این زمینه، به تعداد مقالات منتشر شده استناد شده است. ده مقاله با بیشترین ارجاع مشخص شده‌اند و جالب توجه است که در آمریکا ۱۳۷ مقاله، در هندوستان ۱۰۱ مقاله، در چین ۹۸ مقاله و در ایران ۲۳ مقاله در زمینه مرتبط با پسماند و کووید-۱۹ منتشر شده است [۵۴]. همچنین، به مقالات موجود تا سال ۲۰۲۱ از نظر زیست‌تخریب‌پذیری و سمیت پنام‌ها برای محیط‌زیست و همچنین پراکندگی پسماندهای پنام‌ها در کشورهای مختلف توجه شده است. با وجود شواهد کافی در مورد آلودگی محیط‌زیست، انجام تحقیقات بیشتر در مورد میزان سمیت آنها برای محیط‌زیست ضروری تشخیص داده شده است [۵۵].

با استفاده از برنامه‌ها و مرورگر هوش مصنوعی، تأثیر همه‌گیری کووید-۱۹ بر افزایش مشکلات مختلف اجتماعی در جهان بین سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ میلادی بررسی شده است. بر اساس این بررسی، همه‌گیری کووید-۱۹ بیشترین تأثیر را بر روان انسان‌ها و تولید پسماند در محیط‌زیست داشته است و درنتیجه، راهکارهایی برای مدیریت پسماندها پیشنهاد شده است. بر اساس این گزارش، در شهر تهران قبل از شیوع کووید-۱۹، روزانه ۵۲ تا ۷۴ تن و در ماه‌های شیوع این بیماری در سال ۲۰۱۹، روزانه ۸۰ تا ۱۰۰ تن پسماند بیمارستانی تولید شده است [۵۶].

در گزارشی دیگر، تخمینی از مصرف پنام و پسماند تولیدی در کشورهای آسیایی به‌دست‌آمده است. بر طبق این بررسی، هندوستان بیشترین مصرف و پس از آن، ایران در مرتبه دوم، روزانه بالغ بر پنجاه میلیون پنام (۵۰۶۴۸۰۲۲) مصرف داشته است [۵۷]. برای برخی از کشورهای عرب‌زبان مجاور ایران، شامل عربستان، کویت، امارات، قطر، عمان، بحرین و یمن نیز، با توجه به جمعیت و با ضرایب پذیرش متفاوت، تخمینی از دورریز پنام‌ها و پلی‌پروپیلن مصرفی ارائه شده است [۵۸].

موضوع رهاسازی پنام‌ها در مجاری آب، رودخانه‌ها، مراتع و زمین‌های پوشیده از گیاهان مورد توجه قرار گرفته است و با اشاره به مشخصات پلیمرها، نشان داده شده است که در اثر خرد شدن، به قطعات کوچک و میکروپلاستیک‌ها تبدیل می‌شوند و سپس به مواد غذایی و از آنجا به بدن انسان‌ها انتقال

می‌یابند [۵۹]. همچنین، به اهمیت پایداری محیط‌زیست و به خطرات ناشی از باقی ماندن پنام‌ها و انتقال آنها به جانوران و هوا توجه شده است. در این مطالعه، به سابقه شیوع بیماری کووید-۱۹ در کشور مالزی پرداخته شده است. به‌خصوص با توجه به این‌که پسماندهای حاصل از پنام‌ها بر زندگی جانوران و محیط‌زیست تأثیرات نامطلوب دارد، به دستورات اسلامی، آیات قرآنی و احادیث در مورد حفظ محیط‌زیست و زندگی جانوران توجه داده شده است [۶۰].

پس از بررسی دقیق آمار و ارقام و همچنین استناد به قوانین مرتبط در کشور اندونزی، در خصوص افزایش ضایعات پزشکی ناشی از همه‌گیری کووید-۱۹، به راهکارهای مدیریتی مناسب پرداخته شده و به مشکلاتی که سوزاندن این ضایعات ایجاد می‌کند، توجه شده است [۶۱]. در کشور اندونزی، با شناسایی پلیمر به‌کاررفته در تولید پنام‌ها که پلی‌پروپیلن تعیین شده است، روش‌های مکانیکی، شیمیایی و حرارتی برای بازیافت مواد و یا استفاده از آن‌ها در ساخت قطعات دیگر پیشنهاد شده است [۶۲]. در یک استان از کشور اندونزی، پژوهشی نظری با ارسال پرسشنامه برای دانشجویان چند دانشگاه انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که یکی از راهکارهای موثر برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از پنام‌ها، تشویق و ترغیب دانشجویان به مشارکت فعال در مدیریت پسماند است [۶۳].

در کشور فیلیپین، واقع در غرب اقیانوس آرام با ۷۶۴۰ جزیره و جمعیتی بالغ بر ۱۰۹ میلیون نفر از نژادهای گوناگون، یک نظرسنجی گسترده با ارسال پرسشنامه به بیش از ۱۳۱۱۶ نفر انجام شد. این نظرسنجی به بررسی تأثیر عوامل مختلفی همچون دانش، سن، موقعیت جغرافیایی، جنسیت و سایر پارامترها بر نحوه دفع پَنام‌ها و همچنین توجه به حفظ محیط زیست اختصاص داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که آموزش روش صحیح استفاده از پَنام‌ها برای مراقبت از محیط زیست ضروری است [۶۴]. در سواحل آمریکای لاتین و کارائیب نیز، همزمان با افزایش پسماندهای پلاستیکی در دوران شیوع بیماری کرونا، نیاز به وضع محدودیت‌ها و آموزش‌های لازم مورد تأیید قرار گرفت [۶۵]. همچنین، در منطقه‌ای به نام کامپنگ بارو در کوالالامپورِ مالزی، تحقیقی بر روی ۳۶۱ نفر، با اکثریت بانوان، در مورد رفتار آنها نسبت به مدیریت پسماند پَنام‌ها انجام شد. نتایج این تحقیق حاکی از وجود رابطه مستقیم بین دانش شرکت‌کنندگان و تمایل آنها به مدیریت صحیح پسماندها بود. بر این اساس، آموزش عمومی در این زمینه پیشنهاد گردید [۶۶].

در کشور یونان، با ارسال پرسشنامه الکترونیکی به ۴۶۲ نفر، مشخص شد که ارتباط آماری معتبری بین آگاهی از آثار مخرب پَنام‌های یک‌بارمصرف و ویژگی‌های آماری متفاوت شرکت‌کنندگان وجود ندارد. به عبارت دیگر، حتی افراد علاقه‌مند به محیط زیست نیز از تأثیرات سوء پَنام‌ها بر محیط زیست به طور کامل مطلع نبودند [۶۷]. در کشور کنیا، در مناطق ساحلی مومباسا، کیلیفی و کواله، پسماندهای مرتبط با بیماری کرونا، ۱۰۰ روز پس از اولین شناسایی بیماری در آن کشور، اندازه‌گیری و شمارش شدند. نتایج نشان داد که پسماندهای دریایی به طور کلی کاهش یافته‌اند، اما در سواحل، پسماندهای مربوط به کرونا افزایش داشته که به طور اجتناب‌ناپذیر وارد آب‌های اقیانوس می‌شدند [۶۸].

یک تحقیق گسترده در کشور بنگلادش، اجباری شدن استفاده از پَنام توسط سازمان جهانی بهداشت برای جلوگیری از سرایت بیماری کووید-۱۹ در جهان را تأیید کرد. تأثیر پوشیدن پَنام در سرایت بیماری کووید-۱۹ در یک جامعه در بنگلادش با یک سنجش تصادفی خوشه‌ای بسیار بزرگ تعیین شد. تا ماه ژوئن ۲۰۲۰، سازمان جهانی بهداشت به دلیل فقدان شواهد قطعی، پوشش پَنام را برای جلوگیری از شیوع بیماری کووید-۱۹ اجباری نکرده بود. بنابراین، انجام تحقیقی بر روی یک جامعه بزرگ ضروری به نظر می‌رسید. در ماه نوامبر ۲۰۲۰ تا آوریل ۲۰۲۱، پژوهشی وسیع در کشور بنگلادش بر روی ۶۰۰ دهکده که در سراسر کشور پراکنده بودند، انجام شد. به بخشی از این جمعیت ۳۴۲۱۲۶ نفری، یعنی ۱۷۸۰۰۰ نفر، پَنام رایگان داده شد و آزمایشگران و معتمدین محلی، اهمیت استفاده از آن را برای اهالی شرح داده و راهنمایی کردند؛ ۱۶۴۰۰۰ نفر دیگر نیز بدون پَنام به عنوان گروه کنترل در نظر گرفته شدند. رعایت فاصله‌گذاری اجتماعی در هر دو گروه انجام می‌شد. نتیجه این پژوهش، تأثیر قابل توجه پوشیدن پَنام را تأیید کرد: با ۳۰ درصد افزایش در پوشش، حدود ۱۰ درصد کاهش در سرایت بیماری مشاهده شد [۶۹].

در طولانی‌ترین ساحل دریایی جهان، موسوم به کوکس بازار، واقع در کشور بنگلادش و خلیج بنگال، پَنام‌های دور ریخته شده در ساحل شمارش شده‌اند و به‌طور متوسط به میزان ۰/۰۰۶۲۹ عدد در هر متر مربع می‌رسید که برای کاهش آن، باید از دورریزی غیرقانونی جلوگیری شده و آموزش‌های لازم برای مدیریت صحیح به مردم ارائه شود [۷۰]. در اولین ماه پس از قرنطینه اجباری، ۱۴۵۰۰۰ تن ضایعات پلاستیکی مضر تولید شد که دو برابرِ ماه‌های قبل از آن بود. افزایش پلاستیک‌ها به دلیل افزایش استفاده از ظروف غذای بیرون‌بر نیز بود. از آنجا که ماندگاری ویروس بر روی پلاستیک‌ها طولانی‌تر از کاغذ است، پیشنهاد شد که از پاکت‌های کاغذی استفاده شود [۷۱].

در شهر تورنتو، مرکز استان انتاریو در کشور کانادا، توزیع پسماندهای پلاستیکی در دوران شیوع بیماری کرونا شمارش و تعیین شده است. بیشترین پسماند دورریز، دستکش و پس از آن، پَنام‌ها بودند. دستکش‌ها بیشتر در پارکینگ‌های فروشگاه‌های بزرگ و پَنام‌ها بیشتر در اطراف بیمارستان‌ها یافت شدند. روزانه، میزان پسماند دورریز از ۰/۰۰۰۲۰ تا ۰/۰۰۴۷۵ قطعه بر متر مربع، بر حسب نوع پسماند و محل شمارش، متغیر بود [۷۲]. تعداد قابل‌توجه پَنام‌های استفاده‌شده در سواحل کشور شیلی در زمان‌های مختلفی تعیین شده است. در ایام پاییز و زمستان، این میزان به ۰/۲ قطعه در کیلومتر در روز و در ایام تابستان، به ده برابر این مقدار می‌رسید. آموزش و راهنمایی مردم در دورریزی پسماندها در محل‌های تعیین‌شده، موجب کاهش دورریز می‌گردید [۷۳].

در کشور انگلستان، پیش از اجباری شدن پوشیدن پَنام، مشکلات محیط زیستی آن مورد توجه قرار گرفت. برآورد شده است که اگر روزانه تنها یک پَنام یک‌بارمصرف توسط هر نفر استفاده شود، در پایان یک سال، با ۶۶۰۰۰ تن پلاستیک‌های زائد مواجه خواهیم بود که موجب آلودگی محیط‌زیست

می‌شد. در نتیجه، آموزش چگونگی مصرف و دور انداختن صحیح پَنام باید مورد توجه قرار می‌گرفت [۷۴]. تأثیرات پوشش اجباری پَنام در انگلستان بر سرعت شیوع بیماری همه‌گیر، با مقایسه پَنام‌های یک‌بارمصرف و قابل استفاده مجدد، از جنبه‌های مختلفی مورد توجه جمعی از محققین قرار گرفته است تا مشکلات محیط زیستی را کاهش دهد [۷۵].

تدبیری که در کشور چین برای خدمات بازیافت پَنام‌ها بر مبنای رفتار محیطی پیشنهاد شده است، بسیار جالب توجه است. این راهکار با بهره‌گیری از علم طراحی و با در نظر داشتن تجزیه و تحلیل روانی و همچنین تحلیل ذی‌نفعان، ارائه شده است. به وسایل بازیافت با شکل و علائم هشداردهنده پرداخته شده و ارتباطی بین سامانه موجود و رفتار روانی به‌دست آمده است. به‌گونه‌ای که در نهایت، وسایل و علائم هشداری که بیشترین تأثیر را دارند، طراحی شده است [۷۶]. با توجه به اهمیت محیط زیست و ضرورت حفظ منابع انرژی، روش‌های تولید، بازیابی یا گندزدایی پَنام‌ها در کشور چین شرح داده شده و تحقیقات برای یافتن روش‌های مناسب‌تر پیشنهاد شده است [۷۷].

در منطقه نیو ساوت ولز کشور استرالیا، مشاهده شده است که با اجباری شدن پوشیدن پَنام در طول دوران شیوع بیماری کرونا، دورریز وسایل حفاظت شخصی مانند دستکش و به‌ویژه پَنام، به‌شدت افزایش یافته است. تجزیه و تحلیل نتایج مشاهدات نشان می‌دهد که ۸۰ درصد دورریزها به‌صورت انفعالی انجام شده است که این امر بیانگر بی‌توجهی بیشتر مردم به حفظ محیط زیست است [۷۸].

تفاوت اقتصادی و محیطی استفاده از پَنام‌های یک‌بارمصرف و پَنام‌های با قابلیت چند بار استفاده، برای سامانه بهداشتی بلژیک با ۵۲۰۰۰ تخت و دو پرستار برای هر تخت، ارزیابی شده است. نتایج محاسبات نشان داد که استفاده از پَنام‌های چند بار مصرف از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است [۷۹]. در یک نظرخواهی از نمونه‌ای شامل ۷۰۲ نفر در کشور رومانی، مشخص شد که جنسیت افراد و اطلاع از نوع ماده به‌کاررفته در پَنام، بر دورریز صحیح پَنام‌های یک‌بارمصرف مؤثر است [۸۰].

در مطالعه‌ای که در کشور غنا، در مرکز شهر آدام کوماسی در محله آبناس انجام شده است، در مسیری به طول ۱۷۲۰ متر، ۵۳۵ پَنام شمارش و مورد آزمایش‌های دیگر قرار گرفته است. پژوهشگران معتقدند که پَنام‌های آلوده، خود موجب گسترش بیشتر بیماری و نیز آلودگی محیط به ریزذرات پلاستیک‌ها می‌شوند [۸۱].

در یک نظرسنجی ملی در کشور مکزیک با جمعیتی بالغبر ۱۲۶۰۱۴۰۲۴ نفر که با استفاده از پرسشنامه‌های گوگل روی نمونه‌های تصادفی انتخابی انجام شد، مشخص شد که ۳۵ درصد از پاسخ‌دهندگان، پَنام‌های مصرف‌شده را با ضایعات خانگی مخلوط می‌کنند و ۶۱/۵ درصد از وجود برنامه مدیریتی برای چگونگی دفع این ضایعات مطلع نبودند. بر این اساس، مدیریت مطلوب پسماندها امری ضروری شناخته شده است [۸۲].

در کشور دانمارک، به امر اطلاع‌رسانی کامل به‌منظور راهنمایی در خصوص چگونگی دفع زباله‌های حاصل از پَنام‌ها، توجه شده است. در این مورد مشاهده گردید که دوسوم پَنام‌ها دارای اطلاعات نوشتاری یا تصویری برای دور ریختن پَنام‌ها بودند [۸۳].

تأثیراتی که یک محصول بر هوای محیط‌زیست می‌گذارد و موجب گرم شدن کره زمین می‌شود، به‌وسیله اثر کربن، که علامت اختصاری آن CF است، تعیین می‌شود. اثر کربن برای پَنام‌های مصرفی در بخش مواد غذایی، شامل رستوران‌های سرپایی و معمولی، با استفاده از روش‌های استاندارد در کشور ایتالیا تعیین شده است. پَنام‌های موسوم به FFP2 از جنس پلی‌پروپیلن، بیشترین تأثیر را بر اثر کربن هوا داشتند [۸۴].

در هنگ‌کنگ، برای جمع‌آوری پارچه‌های بی‌بافتِ مورد استفاده در پَنام‌ها، روش‌های بازیابی و استفاده از شبکه اینترنتی موسوم به آی‌اوتی، که کارکرد دستگاه‌های بازیابی را هماهنگ می‌کند، تشریح شده است [۸۵].

در کشور ایران، سرچشمه چالش‌های مدیریت زباله‌های شهر اصفهان پس از شیوع بیماری کرونا مورد توجه قرار گرفت و پیشنهادهایی برای بهبود مدیریت زباله‌ها ارائه شد [۸۶]. برای شهر تهران، وضعیت زباله‌های پلاستیکی حاصل از افزایش آن‌ها در سال شیوع بیماری، تجزیه‌وتحلیل شده است. شهروندان تهرانی روزانه چهار و نیم میلیون (۴/۵) پَنام استفاده می‌کردند که به‌صورت زباله دفع می‌شد. در این تحقیق، حداقل راهکارهای بهبود مدیریت پسماندها ارائه شده است [۸۷].

در جزیره کیش، واقع در خلیج‌فارس، از طریق نمونه‌برداری استاندارد و روش‌های فیزیکی-شیمیایی، آلودگی محیط مشخص شده است. به‌طور متوسط ۰/۰۰۰۲۳۴ قطعه پَنام بر مترمربع وجود داشت که در حال تجزیه شدن در اثر نور، اکسایش و تبدیل‌شدن به میکروپلاستیک‌ها بودند. لازم به ذکر است که لایه‌های میانی پَنام‌ها بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته بودند [۸۸]. دریای خزر، وسیع‌ترین دریای درون‌خشکی جهان است که به اقیانوس‌ها ارتباط آبی ندارد. حفظ آن بسیار ارزشمند است. در یک تحقیق میدانی ارزشمند، حاتمی و همکاران [۸۹] به موضوع آلوده شدن این دریا به‌وسیله محافظ‌های شخصی PPE، شامل پَنام، دستکش و غیره پرداخته‌اند. توزیع محافظ‌ها در سواحل ایرانی دریای خزر، ۰/۰۰۰۱۰۲ قطعه محافظ بر مترمربع بوده که ۹۵/۳ درصد آن‌ها پَنام پزشکی بوده است. بر اساس یافته‌ها، پیشنهادهای لازم صورت گرفته است [۸۹]. در جنوب ایران، خلیج‌فارس، در سواحل بوشهر نیز مطالعات جالبی درباره آلودگی ساحل به محافظ‌ها در مقابل بیماری کرونا توسط اخباری‌زاده و همکاران انجام شده است [۹۰]. اطلاعات به‌دست‌آمده برای حفظ محیط‌زیست بسیار حائز اهمیت است. به‌صورت جالب‌توجهی نشان داده شده است که پَنام‌های تجزیه‌شده منبع میکروپلاستیک‌ها می‌باشند [۹۰]. در ایران، در مازندران، موسوی و بروجنی در نامه‌ای به سردبیر، به‌صورت مدلل، مشکلاتی که پسماندهای پزشکی در زمان شیوع بیماری به وجود می‌آورند را عنوان کرده و ضمن اشاره به بی‌توجهی‌ها، مدیریت صحیح آن‌ها را پیشنهاد نموده‌اند [۹۱].

جدول ۱ تخمینی از دورریز پلاستیک‌ها و تعداد پنام مصرفی و جمعیت برخی کشورها، کوتاه شده از [۵۰].

مرتبه	نام کشور	جمعیت (میلیون نفر)	تعداد پنام مصرفی در روز (میلیون)	تخمینی از دورریز پلاستیک (میلیون تن)
۱	چین	۱۴۳۹	۷۰۲	۱۰۷
۲	هندوستان	۱۳۸۰	۳۸۶	۱۰۳
۳	آمریکا	۳۳۱	۲۲۰	۲۵
۴	برزیل	۲۱۳	۱۴۰	۱۶
۵	اندونزی	۲۷۳	۱۲۲	۲۱
۶	ژاپن	۱۲۶	۹۳	۹
۷	روسیه	۱۴۶	۸۶	۱۱
۸	مکزیک	۱۲۹	۸۱	۱۰
۹	نیجریه	۲۰۶	۷۵	۱۵
۱۰	پاکستان	۲۲۱	۶۲	۱۷
۱۱	بنگلادش	۱۶۵	۵۱	۱۲
۱۲	ترکیه	۸۴	۵۱	۶
۱۳	ایران	۸۴	۵۱	۶
۱۴	آلمان	۸۴	۵۱	۶
۱۵	انگلستان	۶۸	۴۵	۵

۲-۳ تحقیقات تجربی

علی‌رغم وجود مقالات مروری قابل توجه در حوزه پَنام‌ها و روش‌های به‌کاررفته جهت مقابله با بیماری کرونا که در متن پیشین به آن‌ها اشاره شد، نتایج حاصل از پژوهش‌های تجربی یا نظری در این زمینه، به‌صورت چشم‌گیر منتشر نشده است. در ادامه، به برخی از پژوهش‌های موجود که به سهولت قابل دست‌یابی هستند، اشاره خواهد شد. غالب محققان بر این باورند که بسیاری از مسائل مرتبط با اثرات سوء پَنام‌ها بر محیط زیست، انسان‌ها و جانوران همچنان در هاله‌ای از ابهام قرار داشته و ضرورت دارد تا در آینده، به‌شکل تجربی و در موقعیت واقعی، این موارد بررسی و شفاف‌سازی گردند.

در یک مطالعه، پَنام‌های یک‌بار مصرف متعلق به دو شرکت تولیدکننده چینی و مالزیایی، در محیط آبی با سطوح مختلف pH (اسیدی و قلیایی) به مدت یک شبانه‌روز و همراه با هم‌زدن قرار گرفتند. سپس مواد شیمیایی آزادشده از آن‌ها اندازه‌گیری گردید. یافته‌ها حاکی از آن بود که پَنام‌ها دارای فلزات سنگینی همچون سرب، کروم و کادمیوم هستند که از آن‌ها رهاسازی می‌شود. این مواد، برای انسان و محیط زیست زیان‌آور تلقی می‌شود. همچنین، تجزیه حرارتی پَنام‌ها، منتج به تولید گازهای آلی فرار مانند ۲،۴-دی‌متیل‌هپ-۱-ان و ۴-متیل‌هپتان می‌شود. در همین راستا، پیشنهادهایی در جهت بهبود فرآیندهای تولید و مدیریت صحیح پسماندها به منظور کاهش این مواد آسیب‌رسان در طبیعت ارائه شده است [۹۲].

در یک آزمایش مقیاس کوچک که به مدت شش ماه به طول انجامید، پَنام جراحی پلی‌پروپیلن در خاک سطحی قرار داده و میزان تخریب آن اندازه‌گیری شد. نتایج بدست‌آمده نشان داد که میکروارگانیسم‌ها عامل اصلی تخریب هستند. همچنین، مشاهده شد که پَنام‌ها در محیط آبی برای مدت زمان طولانی، بدون تغییر و سالم باقی می‌مانند. بر اساس این یافته‌ها، پیشنهاد شد که ماهیت میکروبی تخریب به شکل دقیق‌تری شناسایی شود [۹۳].

در طول همه‌گیری بیماری کرونا، پژوهش‌های آزمایشگاهی معدودی در خصوص اثرات متقابل آلودگی ناشی از پلاستیک‌ها و تغییر ویژگی‌های آب (دما و اسیدی شدن) بر گیاهان دریایی انجام گرفته است. در این میان، تنها به یک مورد اشاره می‌شود: تأثیر آلودگی بر تجزیه گیاه کتانجک (نوعی خزه دریایی) تعیین شده است. نتایج حاکی از آن است که افزایش آلودگی، سرعت تجزیه را کاهش داده، در حالی که افزایش دما، تأثیر افزایشی بر آن داشته است [۹۴].

به منظور مقایسه، پَنام‌های ساخته شده از جنس پنبه و پلی‌پروپیلن در محیط آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده مورد آزمایش قرار گرفتند. مشخص گردید که پَنام پنبه‌ای، اثری بر سرعت تجزیه گیاه نداشته، در حالی که پَنام‌های یک‌بار مصرف، سرعت تجزیه را افزایش می‌دهند [۹۵]. میکروپلاستیک‌های حاصل از پَنام‌ها، بر رشد ریزجلبک‌ها اثرگذار بوده و سبب آلودگی آب‌های محیط می‌شوند. در پژوهشی دیگر که در آن، پَنام‌ها در محفظه رشد ریزجلبک‌ها قرار داده شدند، پس از گذشت سه ماه، ملاحظه شد که عواملی چون تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD)، تقاضای اکسیژن بیولوژیکی (BOD)، اکسیژن محلول (OD) و pH تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. همچنین، ترکیبات شیمیایی به وجود آمده مانند متیل الکل (CH_3OH) و کتون‌ها (C=O)، نشان دادند که پَنام‌های رها شده در محیط، دچار تخریب شده‌اند و برای محیط زیست بسیار خطرناک هستند [۹۶].

موضوع تجزیه پَنام پزشکی تحت تأثیر نور فرابنفش و هم‌زدن شدید، که مشابه با فرآیند تخریب در محیط دریا است، مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس یافته‌ها، مشاهده شد که یک پَنام پس از قرارگیری در معرض نور فرابنفش و ۱۸۰ ساعت هم‌زدن شدید، روزانه به ۱۷۳۰۰ میکروالیاف تجزیه می‌شود. همچنین، تجزیه شیمیایی نشان داده است که چنین ذراتی در سواحل ایتالیا به فراوانی یافت می‌شوند؛ موضوعی که از منظر محیط زیست دریایی حائز اهمیت است [۹۷].

در پژوهشی دیگر، سرعت رهاسازی و پراکندگی ذرات بسیار کوچک پلاستیکی (الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) از سه نوع پَنام، شامل پَنام N95، پزشکی و معمولی، در محیط آبی اندازه‌گیری گردید. نتایج بیانگر آن بود که سرعت رهاسازی ذرات از پَنام‌ها متفاوت بوده و کمترین میزان مربوط به پَنام N95 است. با توجه به مصرف بسیار زیاد پَنام‌ها (حدود ۲۰۰ میلیون عدد در روز)، پیشنهاد شده است که به منظور پیشگیری از گسترش این ذرات در محیط زیست، برنامه‌ریزی‌های لازم در کشور چین صورت پذیرد [۹۸].

یکی از کاربردهای بالقوه پَنام‌ها در امور قضایی، امکان حفظ DNA بر روی آن‌ها است. در یک مطالعه انجام شده بر روی ۲۵۱ نفر، مشاهده شد که ۴۱ درصد از پَنام‌های پنبه‌ای به صورت مکرر مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که ۳۱ درصد از پَنام‌های N95 و ۲۶ درصد از پَنام‌های یک‌بار مصرف جراحی استفاده نموده‌اند. آزمایش‌های صورت گرفته نشان داد که پَنام‌ها پس از استفاده، حاوی DNA می‌شوند و بندهای دور گوش دارای مقادیر بیشتری از DNA هستند. همچنین، مدت زمان استفاده از پَنام با مقدار DNA به دست آمده، رابطه مستقیمی دارد، به گونه‌ای که این امر می‌تواند در تحقیقات جنایی مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۹۹].

۳-۳- ارزیابی چرخه حیات یک محصول

ارزیابی چرخه حیات (LCA) یک محصول، روشی برای تعیین کمّی اثرات کلیه فرآیندها از قبیل تولید، مصرف و بازگشت محصول به طبیعت به صورت زباله (از تولد تا پایان عمر) است. این روش با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری به محاسبه اثرات تمامی عواملی که می‌توانند بر محیط زیست تأثیرگذار باشند، می‌پردازد. در این روش، تأثیراتی که پَنام در طول عمر خود می‌تواند بر گرمایش جهانی، مصرف آب، انتشار سموم در خاک، سموم سرطان‌زا برای انسان، منابع فسیلی، تشعشعات یون‌ساز، سمیت غیرسرطانی برای انسان، سمیت برای محیط دریا، سمیت برای آب‌های شیرین و اسیدی شدن خاک داشته باشد، در محاسبات لحاظ می‌شود. نتایج حاصل از کاربرد چنین روشی نشان داده است که تولید و دفع پَنام‌ها موجب افزایش دمای کره زمین می‌شود [۱۰۰]. همچنین، نتایج بیانگر آن است که لازم است پَنام جدیدی طراحی شود که در آن به جای بند حلقه‌ای دور گوش، از یک نوار روبانی شکل استفاده شود [۱۰۱]. با به کارگیری روش ارزیابی چرخه حیات در خصوص پَنام‌های یک‌بارمصرف پلی‌پروپیلن، پَنام‌های چند بار مصرف پنبه‌ای و نیز پَنام‌های پشمی، مشخص شد که اگرچه در ابتدای امر، اثرات نامطلوب تولید یک پَنام یک‌بارمصرف پلی‌پروپیلن بر محیط زیست کمتر از یک پَنام پشمی است، ولی زمانی که اثرات برای یک سال محاسبه شود، پَنام‌های پشمی به دلیل ماهیت چند بار مصرف بودنشان، اثرات نامطلوب زیست‌محیطی بسیار کمتری نسبت به پَنام‌های پلی‌پروپیلنی یک‌بارمصرف خواهند داشت [۱۰۲]. تأثیرات پَنام‌های یک‌بارمصرف و پَنام‌های چند بار مصرف نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس نتایج، آثار پَنام‌های چند بار مصرف، در صورتی که برای یک سال در نظر گرفته شوند، نسبت به پَنام‌های یک‌بارمصرف مطلوب‌تر خواهد بود [۷۴،۷۵].

به منظور بررسی بسته محافظتی بیمارستانی، که شامل اقلامی نظیر عینک پلاستیکی، دستکش، پَنام، روکش کفش، پیراهن و شلوار است، ارزیابی چرخه حیات محصول با استفاده از نرم‌افزار GaBi نسخه ۷/۸، برای دو مسیر سوزاندن و یا دفن در زمین انجام شده و عوامل مختلف مؤثر بر آب و هوای خشکی و دریایی در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که اثرات سوزاندن در مقایسه با دفن در زمین کمتر بوده است [۱۰۳]. روش ارزیابی چرخه حیات تولید فیلامنت برای چاپ سه‌بعدی، با قطری در محدوده استاندارد ۱/۷۵ و ۲/۸۵ میلی‌متر از ترکیب پَنام‌ها با پلی‌پروپیلن نیز بر اساس استاندارد ISO 14040 صورت پذیرفت و مشخص شد که از منظر زیست‌محیطی، مناسب و در حفظ آن مؤثر است [۱۰۴]. همچنین، با انجام ارزیابی چرخه حیات، مشخص شده است که سوزاندن پسماندهای پزشکی همراه با پسماندهای جامد شهری در کشور چین، روشی مطلوب‌تر نسبت به سایر روش‌ها است [۱۰۵].

۴ میکروپلاستیک‌ها و نانو پلاستیک‌ها

اغلب پلاستیک‌ها، هنگامی که برای مدت طولانی در محیط باقی می‌مانند، به‌تدریج تحت تأثیر واکنش‌های شیمیایی ناهمگن، تجزیه شده و به ذرات کوچک‌تری تبدیل می‌شوند. این ذرات که با نام‌هایی چون میکرولیف‌ها، میکروپلاستیک‌ها، نانوپلاستیک‌ها یا نانولیف‌ها شناخته می‌شوند، در بسیاری از موارد به عنوان عناصر آسیب‌رسان برای حفظ محیط زیست طبیعی تشخیص داده شده‌اند. شواهد نشان می‌دهد که پَنام‌ها می‌توانند یکی از منابع تولید پلاستیک‌های خرد و ریز باشند [۱۰۶]. در این بخش، به منظور نشان دادن اهمیت موضوع، به تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه اشاره می‌شود. تاریخچه میکروپلاستیک‌ها، روش‌های شناسایی آن‌ها (شکل‌شناسی، رسوب‌گذاری، روش‌های تعیین ساختار شیمیایی و غیره)، یافته‌ها در اقیانوس‌ها و چگونگی انتقال آن‌ها به انسان از طریق مواد غذایی، به تفصیل شرح داده شده است. خطرات میکرولیف‌ها در محیط‌های آبی و انتقال آن‌ها به انسان و برخی دیگر از موجودات زنده مانند ماهی‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰۸، ۱۰۷].

شناسایی میکروپلاستیک‌ها با مشکلاتی همراه بوده است و برای شناسایی آن‌ها، اندازه‌گیری جرم مخصوص با استفاده از مخلوط آب، الکل و گلوکز پیشنهاد شده است [۱۰۹]. عدم آگاهی عمومی، سبب پراکنده شدن پَنام‌ها در محیط می‌شود و پَنام‌های یک‌بارمصرف به‌ویژه از جنس پلی‌پروپیلن و پلی‌الفین به نانوذرات و میکروذرات تجزیه می‌شوند. جدا شدن این ذرات با توجه به ساختار شیمیایی و کوچکی اندازه، هنگام بازگردانی آب در تصفیه‌خانه‌های پساب‌ها، علاوه بر دفن در زمین‌ها، موجب بروز مشکلاتی در تصفیه آب نیز می‌شوند [۱۱۰]. پَنام‌های جراحی نیز از این قاعده مستثنی

نیستند. نه‌تنها پَنام‌های یک‌بارمصرف در افزایش پسماند مؤثرند، بلکه پَنام‌های قابل شستشو نیز، هنگام شستشو میکروالیف‌هایی از آن‌ها خارج می‌شود که به مجاری آبی و خوراکی منتقل شده و برای رهایی از آسیب‌های آن‌ها یک برنامه‌ریزی جهانی پیشنهاد شده است [۱۱۱].

میزان مصرف پَنام، تعداد بیماران و همچنین میزان میکروپلاستیک‌های تولیدی در ۳۶ کشور جهان، با استناد به آمار و ارقام منتشر شده، تخمین زده شده است. در این میان، کشور ایران با جمعیتی بالغ بر ۸۵،۲۷۵،۴۶۵ نفر، در بین ۳۶ کشور مورد بررسی، با مصرف سالیانه ۲۹۵۰۰۰ تن پَنام و تولید ۱۸۷۰۰۰ تن میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن، رتبه سیزدهم را به خود اختصاص داده است[۱۱۲].

پژوهشی جالب و مفید در اواخر سال ۲۰۱۷ و اوایل سال ۲۰۱۸ میلادی در بندر ترکمن در ساحل جنوب شرقی دریای خزر، توسط تقی‌زاده رحمت‌آبادی و همکاران[۱۱۳] صورت پذیرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که در دستگاه گوارش نوعی از ماهی‌های سفید موسوم به کوتوم، مقادیر قابل توجهی از میکروپلاستیک‌ها، اغلب با ابعادی کمتر از ۵۰۰ میکرومتر و به شکل الیاف میکرو، یافت شده است. بر اساس یافته‌های این تحقیق، پیشنهاد شد مطالعات تکمیلی در این زمینه انجام شود. لازم به ذکر است که این نوع ماهی جهت مصارف تغذیه‌ای در بازار عرضه می‌شد.

در آزمایشی دیگر، پَنام‌های جراحی پس از شستشو به مدت ۲۴ ساعت در آب خالص، یا همراه با الکل یا سطح فعال مایع، تحت هم‌زدن با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه قرار گرفتند و سپس مقدار میکروپلاستیک‌های تولیدی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان هم‌زدن، و یا افزودن الکل و یا سطح فعال، مقدار میکروپلاستیک‌های تولیدی نیز افزایش می‌یابد [۱۱۴]. در پژوهشی مشابه، نمونه‌هایی از پَنام سه‌لایه، پس از جدا کردن لایه‌ها، بند و قطعه فلزی، در معرض اشعه ماوراء بنفش قرار گرفتند. همچنین نمونه‌هایی به همراه ماسه‌های کنار دریا، با یکدیگر مخلوط شدند و تغییرات خواص آن‌ها مورد سنجش واقع شد. بررسی‌ها نشان داد که خواص فیزیکی و شیمیایی لایه میانی در اثر تابش نور ماوراء بنفش بیشتر از دولایه دیگر تغییر می‌کند و همچنین وجود ماسه‌ها بر میزان تخریب تأثیرگذار بوده و آن را افزایش می‌دهد. در واقع، یک پَنام می‌تواند بیش از یک و نیم میلیون میکروپلاستیک تولید کند و در حضور ماسه این میزان به بیش از ۱۶ میلیون ذره می‌رسد. لذا آب و هوای ساحلی بر پَنام‌هایی که در ساحل قرار می‌گیرند، تأثیر گذاشته و موجب تخریب سریع‌تر آن‌ها می‌شود[۱۱۵].

در پژوهشی دیگر، نمونه‌هایی از هر سه لایه پَنام‌های جراحی در محیط‌های مختلف شامل آب دریا، آب رودخانه، سطح خاک و زیر خاک، به مدت ۳۰ روز قرار داده شدند و تغییرات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که نمونه‌هایی که در خاک قرار گرفته بودند، به‌طور متوسط ۳۵۴۳ ± ۲۵۱۴۱ ذره میکروپلاستیک به ازای هر پَنام تولید کردند که این میزان بیشتر از نمونه‌هایی بود که در آب رودخانه و دریا قرار گرفته بودند. همچنین، تخریب لایه میانی بیشتر از لایه‌های دیگر مشاهده شد. در نهایت، رابطه سینتیکی تجزیه پَنام‌ها محاسبه و همچنین شکسته شدن پیوندهای شیمیایی نیز مشاهده شد [۱۱۶].

به منظور برنامه‌ریزی برای مدیریت پَنام‌ها و پلاستیک‌ها، مصاحبه‌ای حضوری با ۴۳۷ نفر در شانگهایِ کشور چین انجام شد. نتایج این مصاحبه نشان داد که تنها ۲۶ درصد از شرکت‌کنندگان در مورد موضوع میکروپلاستیک‌ها اطلاع داشتند. پس از ارائه آموزش‌های لازم، ۷۵ درصد از افراد شرکت‌کننده تمایل خود را برای کاهش مصرف پلاستیک و پَنام اعلام نمودند و در این میان، تمایل زنان بیشتر از مردان بود [۱۱۷].

همچنین، در سواحل بریتانیا در دستگاه گوارش ۵۰ پستاندار دریایی، میکروپلاستیک‌ها مشاهده شده است. با این حال، برای تعیین مشکلات احتمالی که ممکن است برای سلامتی این جانوران ایجاد شود، انجام پژوهش‌های تکمیلی پیشنهاد شده است [۱۱۸]. بر اساس تحقیقات انجام شده، مشخص گردیده است که وسایل محافظت شخصی شامل پَنام‌ها، پیراهن و غیره، به میکروپلاستیک‌ها تبدیل شده و در محیط زیست، از جمله آب‌های شیرین و اقیانوس‌ها، وارد می‌شوند و توسط جانداران بلعیده می‌شوند که این امر خطراتی را به دنبال خواهد داشت. لذا پیشنهاد می‌شود که دولت‌ها با ارائه آموزش و وضع قوانین پیشگیرانه، از دفع نادرست این‌گونه وسایل جلوگیری نمایند [۱۱۹].

در یک مقاله مروری دیگر، میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلنِ موجود در آب‌های اقیانوس‌ها و آب‌های شیرین، به عنوان عامل ایجاد خطراتی برای آبزیان معرفی شده‌اند [۱۲۰]. در رودخانه‌ای با عمق نیم تا یک متر در پکن چین، پَنام‌ها جمع‌آوری و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج این آزمایش نشان داد که علاوه بر میکروپلاستیک‌ها، عناصر سمی نیز از طریق پَنام‌ها به رودخانه منتقل شده و برای آبزیان خطر ایجاد می‌کنند [۱۲۱]. در سواحل جنوب هندوستان نیز، در نمک‌های دریایی خوراکی، میکروپلاستیک‌های مختلف به ترتیب فراوانی شامل پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، نایلون و سلولزی وجود داشته و اندازه‌گیری شده است [۱۲۲].

به منظور بررسی میزان تولید میکروپلاستیک از پَنام‌ها، نمونه‌هایی از پارچه‌های بی‌بافت که الیاف آن‌ها به روش ذوب‌افشانی تهیه شده بود، به همراه بندِ نگه‌دارنده‌ی پَنام (شامل انواع پَنام‌های N95، پَنام پزشکی و پَنام حاوی کربن فعال) در شرایط مختلف شامل آبِ خالص، آب رودخانه، آب دریا و آبِ حاویِ مواد شیمیایی قرار داده شدند. پس از ۲۴ ساعت حرکت دادن، تعدادِ میکروپلاستیک‌های آزاد شده شمارش گردید. نتایج نشان داد که بیشترین تعداد میکروپلاستیک مربوط به پلی‌پروپیلن (۱/۵۷ درصد) و بندِ پلی‌یورتان (۲۴/۵ درصد) بوده است. همچنین مشخص شد که دما و میزان اسیدی و بازی محیط بر تخریب و تولید میکروپلاستیک موثر است. به‌طوری که در دمای ۱۵ درجه سلسیوس، به طور متوسط ۱۰۴۳ ± ۱۵۵ میکروپلاستیک از هر پَنام تولید شد، در حالی که این میزان در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به ۲۹۴۰ ± ۳۹۲ میکروپلاستیک افزایش یافت. بدین ترتیب، تاثیر دما بر تولید میکروپلاستیک به مراتب بیشتر از سایر عوامل مؤثر بوده است [۱۲۳]. در آزمایشی دیگر، چند نوع پَنام پزشکی و N95 تولید شده در کشورهای مختلف شامل چین، آمریکا، ژاپن، کره و ویتنام، در آب به مدت مشخصی تکان داده شدند. نتایج نشان داد که همگی منجر به تولید

میکروپلاستیک و نانوپلاستیک‌هایی با اندازه‌ای بین ۵ نانومتر تا ۶۰۰ میکرومتر شده‌اند [۱۲۴].

در یک بررسی دیگر، غلظت میکروپلاستیک‌ها در مجرای ورودی و خروجی سامانه تصفیه آب در سایگونِ کشور ویتنام، اندازه‌گیری شد. در این تصفیه‌خانه، آب در چند مرحله تصفیه می‌شود اما اندازه‌گیری در مراحل میانی تصفیه امکان‌پذیر نبود. غلظت میکروپلاستیک‌ها در مجرای ورودی در محدوده ۱۰/۱۸۸ تا ۱۵/۰۷۴ گرم بر لیتر و در مجرای خروجی در محدوده ۰/۶۴۸ تا ۲/۱۰۷ گرم بر لیتر، با اشکال مختلف فیلامنتی، نواری و دانه‌ای، اندازه‌گیری شد. طول متوسط فیلامنت‌ها ۴۲۴/۶۸ میکرومتر، شعاع آن‌ها ۱۰۰/۴ میکرومتر و شعاع متوسط دانه‌ها ۱۱۳/۸۱ میکرومتر بود. سایر ذرات نیز به صورت نواری اندازه‌گیری شدند [۱۲۵].

تحقیقات نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها توانایی جذب فلزات سنگین را دارند. در یک مطالعه شبیه‌سازی شده با استفاده از نمونه‌های رسوبی از منطقه‌ای مرطوب از دریاچه‌ای در چین، مشخص شد که ظرفیت جذب فلزات سنگین در پلی‌پروپیلن بیشتر از پلی‌اتیلن و در پلی‌اتیلن بیشتر از پلی‌یورتان است. فلزات جذب شده شامل مس، سرب و کادمیوم بود که به ترتیب ذکر شده، بیشترین میزان جذب را داشته‌اند [۱۲۶].

به منظور بررسی خطرات میکروپلاستیک‌ها برای موجودات زنده، آزمایش‌هایی با استفاده از گورخرماهی انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها اثرات نامطلوبی بر کبد این موجودات آبزی بر جای می‌گذارند. بدین ترتیب، میکروپلاستیک‌ها خطرات جدی برای جانوران آبزی محسوب می‌شوند [۱۲۷]. همچنین، تأثیر میکروپلاستیک‌های حاصل از لایه‌های بیرونی، فیلتر میانی و لایه درونی پَنام‌های پزشکی پلی‌پروپیلنی بر دوره زندگی و تولیدمثل بی‌مهرگان شامل خرخاکی، شپشک آرد و کرمک سفید مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام این آزمایش، لایه‌های بیرونی، میانی و درونی پَنام‌ها پس از قرارگیری در نیتروژن مایع، آسیاب شده و به ذرات میکروپلاستیک با ابعاد متفاوت ۴۲ تا ۵۶ میکرومتر تبدیل شدند و سپس در محیط‌های زندگی بی‌مهرگان قرار گرفتند. نتایج نشان داد که میکروپلاستیک‌ها تأثیری بر دوره زندگی و تولیدمثل کرمک‌های سفید ندارند، اما خرخاکی و شپشک آرد تحت تأثیر قرار می‌گیرند [۱۲۸]. بررسی‌های دیگری نیز نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌های حاصل از لایه‌های پَنام‌های پلی‌پروپیلن با خاکشیرها تأثیرات متقابلی دارند، اما تأثیر حاد بر بی‌تحرکی آن‌ها ندارند [۱۲۹]. در یک پژوهش میدانی که به مدت هشت ماه در یک دریاچه طبیعی بر روی نوعی ماهی خالدار انجام شد، مشخص گردید که قرار گرفتن ماهی‌ها در معرض میکروپلاستیک‌های حاصل از پَنام‌های نو یا کهنه، منجر به تأثیر بر آبشش، روده و کبد آن‌ها شده و از تحرکشان کاسته می‌شود [۱۳۰].

ویژگی‌های میکروپلاستیک‌های حاصل از پنام‌ها در مقالات مروریِ جدیدی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این میکروپلاستیک‌ها اغلب دارای ابعادی کمتر از یک میلی‌متر بوده و شفاف هستند. میزان تولید آنها در انواع مختلف پنام به شرایط آب‌وهوایی محیط و عادات کاربران وابسته است [۱۳۱]. از زمان شیوع بیماری کووید-۱۹، روزانه حدود ۱/۶ میلیون تن ضایعات پلاستیکی تولید می‌شود که بیشتر این حجم به علت مدیریت نادرست دفع ضایعات وسایل حفاظتی مانند پنام‌ها و نقاب‌های شفاف به وجود آمده است. بخش عمده‌ای از این ضایعات، در نهایت به میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها تجزیه می‌شوند و وارد محیط‌های خشکی، آبی و زنجیره غذایی می‌گردند. این فرایند مخاطرات جدی برای سلامت انسان‌ها ایجاد می‌کند و نیازمند ارائه راهکارهای مؤثر برای جلوگیری از این مسئله است [۱۳۲].

تأثیر میکروپلاستیک‌های بدستآمده از پنام‌ها بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، مجتمع‌های میکروبی، کرم‌های خاکی و رشد گیاه کاهو، در یک دوره ۸۰ روزه تحت شرایط آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج نشان داده است که این میکروپلاستیک‌ها موجب کاهش چگالی خاک شده و تأثیرات مخرب بر مواد شیمیایی خاک، رشد کرم‌های خاکی، جوانه‌زنی بذر کاهو و فعالیت ریشه‌ها دارند [۱۳۳]. همچنین جستجوی کتابخانه‌ای برخط با استفاده از پایگاه‌های Scopus، Google Scholar، PubMed و ScienceDirect نشان داده است که میکروپلاستیک‌ها تأثیرات منفی بر رشد کلرلا دارند. کلرلا، یکی از فراوان‌ترین میکروجلبک‌های سبز تک‌سلولی در محیط‌های آبی، نقش مهمی در تشکیل زنجیره غذایی اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کند [۱۳۴].

۵ تولیدات متفاوت از پنام‌های استفاده شده

می‌توان از پَنام‌های مصرف‌شده به شیوه‌های گوناگونی بهره‌برداری ارزشمند نمود. گام نخست در این راستا، ضدعفونی کردن پَنام‌های آلوده است. لازم به ذکر است که اغلب ویروس‌ها حداکثر تا هفت روز بر روی پَنام‌ها زنده می‌مانند. روش‌های مختلف ضدعفونی کردن پَنام‌ها و سایر پسماندهای پزشکی مورد توجه قرار گرفته و راهکارهای متعددی در این زمینه بررسی شده است [۱۳۵]. روش‌های بهره‌برداری از پَنام‌های مصرف‌شده شامل موارد زیر است: روش‌های شیمیایی مانند پیرولیز (آتش‌کافت) که به تولید سوخت‌های مایع منجر می‌شود و همچنین کربونیزاسیون که کربن تولیدی آن کاربردهای متنوعی دارد. روش‌های فیزیکی نیز شامل فرایندهای حرارتی-مکانیکی، فیلتراسیون و تغلیظ است که در تولید روغن‌های کاهنده اصطکاک (روان‌کننده) مورد استفاده قرار می‌گیرند. ارزیابی این روش‌ها در یک مقاله مروری دیگر بررسی شده است [۱۳۶].

جدول ۲، روش‌های بازیابی و بازیافت پَنام‌های مصرفی، به غیر از تولید انرژی و سوخت را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشهود است، پَنام‌ها در کاربردهای گوناگونی از جمله تولید ستون سیمانی و بلوک‌های سیمانی، اسباب‌بازی، گلدان، ظروف نگهدارنده، جداکننده در باتری‌های قابل شارژ، جداسازی آلاینده‌ها، پانل‌های ضد صدا و صندلی کودک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در اغلب این روش‌ها، ابتدا پَنام‌ها با یکی از روش‌های متداول ضدعفونی شده و سپس بر اساس مورد و نیاز، به کار گرفته می‌شوند.

جدول ۲ بازیابی‌ها و محصول به‌دست‌آمده از پنام‌ها توسط محققینِ مختلف

شماره	نوع پنام مصرفی	عملیات	محصول به‌دست‌آمده	مرجع
۱	پنام پزشکی پلی‌پروپیلن	بند و فلز بریده‌شده ۵ در ۲ میلی‌متر همراه با الیاف بازالت، خرد کردن و مخلوط کردن با سیمان سبز	ستون و بلوک سیمانی	[۱۳۷]
۲	پنام پزشکی FFP2 پلی‌پروپیلن و پلی‌استر (PET)	خرد کردن و ذوب کردن مناسب برای تزریقی و اکستروژن	اسباب‌بازی، گلدان، ظرف نگه‌دارنده و غیره	[۱۳۸]
۳	پنام N95 کره‌ای و چینی	ترکیب با اسیدسولفوریک ۹۵ درصد	جداکننده در باطری‌های شارژ شونده	[۱۳۹]
۴	پنام جراحی خشک و خردشده همراه با برگ	سوزاندن با برگ درخت در کوره تا دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس	جداسازی آلوده‌کننده‌ها	[۱۴۰]
۵	پنام جراحی	خرد کردن و قرار دادن روی‌هم با دست و پرس	پانل ضد صدا	[۱۴۱]
۶	پنام جراحی	جدا کردن قسمت‌ها و استفاده از تفنگ حرارتی	صندلی بچه	[۱۴۲]
۷	پنام سه‌لایه	جداسازی سیم و بند، خرد و فشردن در لوله	جاذب صدا در ساختمان‌ها	[۱۴۳]
۸	پنام	جداسازی سیم و بند، خرد و مخلوط با خاک سنگ خارا	تقویت خاک سنگ	[۱۴۴]
۹	پنام پزشکی	جداسازی پلی‌پروپیلن و مخلوط با اکریلو نیتریل	لاستیک آکریلونیتریل بوتادین (NBR)	[۱۴۵]
۱۰	پنام مصرف‌شده	جدا کردن سیم و خرد کردن و درون بطری پلاستیکی قرار دادن	تولید آجر طبیعی برای دیوار و اتاق ECOBRICK	[۱۴۶]
۱۱	پنام از منازل	سیم و بند جدا شد و خرد گردید و با سنگ و مصالح مخلوط شد	بلوک کنار خیابان	[۱۴۷]
۱۲	پنام پزشکی	پنام خردشده با چوب ذرت، پوست گردو و نیشکر مخلوط گردید، در کوره در ۲۵۰ سلسیوس سوزانده شد	ذغال برای تولید انرژی	[۱۴۸]
۱۳	پنام پزشکی	خرد کردن	مخلوط با بتن در ساختمان	[۱۴۹]
۱۴	پنام پلی‌پروپیلن	خرد و آسیاب کردن و مخلوط کردن با سیمان و ماسه ۰/۵ درصد	تولید بتن	[۱۵۰]
۱۵	پنام پزشکی یک‌بارمصرف	جدا کردن بند، خرد کردن، مخلوط کردن با سیسال و یا همپ و پرس کردن	لایه کامپوزیت مناسب بسته‌بندی، کارد و چنگال غذاخوری	[۱۵۱]
۱۶	پنام جراحی	خرد و مخلوط کردن با سیمان بازیافته	زیرسازی آسفالت	[۱۵۲]
۱۷	پنام‌های مصرف‌شده	جدا سازی نخ‌های پنبه‌ای، حرارت‌دهی، مخلوط کردن	آسفالت	[۱۵۳]
۱۸	لایه درونی و بیرونی پنام جراحی	جدا کردن اجزاء خرد کردن با قیچی و پاره‌پاره‌کننده ماشینی و مخلوط کردن با پنبه و ریسیدن نخ و بافتِ پارچه حلقوی	نخ و پارچه تریکوبافی شده	[۱۵۴]
۱۹	پنام جراحی	جدا کردن اجزاء و خرد کردن ۳×۵ میلی‌متری، مخلوط کردن با خاک	تقویت خاک ماسه‌ای و زیرسازی جاده‌ها	[۱۵۵]
۲۰	پنام‌های پلی‌پروپیلن	قطعه‌قطعه شده و در حالتِ مذاب با ۲ درصد نانولوله‌های کربنیِ چند دیواره مخلوط شد	پلیمرِ هادی با استحکام و مدول کشسانیِ بسیار زیاد	[۱۵۶]
۲۱	پنام سه لایه پلی پروپیلن و پلی اتیلن	کش و نگه‌دارنده جدا و به قطعات چند میلی‌متری بریده و در حلالی با استفاده از یک کاتالیست (اختراع ثبت‌شده) در دمایی بیشتر از دمای محیط حل شد	مایعی شفاف و مناسب برای کاربردهای بعدی	[۱۵۷]
۲۲	پنام غیرپزشکی یک‌بارمصرف	پنام‌ها خرد و آسیاب شدند و با ذغال مخلوط و پودر شده و در کوره چرخان فولادسازی وارد شده است	بهبود خواص محصولات جانبی در فولادسازی	[۱۵۸]
۲۳	پنام از جنس پلی‌پروپیلن	پنام خرد و اکسترود شد	فیلامنت برای دستگاهِ چاپ سه‌بعدی	[۱۵۹]
۲۴	تمام قسمت‌های پنام	خرد کردن به طول ۸ و ۱۲ میلی‌متر و افزودن به آسفالتِ داغ	بهبود خواص آسفالت، ۱۲ میلی‌متر بهتر از ۸ میلی‌متر	[۱۶۰]

۲۵	پنام‌های پزشکی	گرماکافت مجاورت پیش-کاتالیزورهای فلزی از نوع پروسکایت در ۸۵۰ درجه سلسیوس perovskite-type	نانو مواد کربنی و نانولوله با ساختار گرافیتی و هیدروژن برای ذخیره انرژی	[۱۶۱]
۲۶	پنام‌های پزشکی	پس از خرد کردن با استفاده از پتاسیم هیدروکسید KOH در دمای ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس کربنی شد	الکترودهای متخلخل برای ساخت ابرخازن‌ها	[۱۶۲]
۲۷	پنام جراحی	در سولفریک اسید در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس کربنی شد و با TiO_2 مخلوط	کاتالیزر نوری برای ازبین بردن Rhodamine-B	[۱۶۳]
۲۸	پلاستیک پلی‌اتیلن ترفتالات و پنام‌های پزشکی	فلز و کش پنام‌ها جدا و به‌طور مسطح در هیدرو کلراید دوپامین همراه با مکسین MXene به‌صورت ورقه درآمد	پنل و ورقه که از تداخل امواج الکترومغناطیسی جلوگیری کنند	[۱۶۴]
۲۹	مخلوط پلی‌پروپیلن (پنام) و پلی‌اتیلن ترفتالات (سپر)	در آب فوق بحرانی و در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس	روغن	[۱۶۵]
۳۰	پنام‌های پزشکی	خرد شدن و به روش ذوب و روزن‌رانی	پانل‌های جداکننده ورقه‌های پلاستیکی	[۱۶۶]
۳۱	پنام‌ها	تهیه بالش و پر کردن آن‌ها با پلیمرهای ابر جاذب	مدیریت آب‌رسانی، آبیاری مداوم گیاهان خانگی، در کشاورزی	[۱۶۷]
۳۲	پنام پزشکی	جدا کردن نوار کشی و سیم روی بینی؛ خرد شده دو تا سه سانتیمتر و به سیمان اضافه شده	بتن	[۱۶۸]
۳۳	پنامهای مصرف شده در محیط دانشگاه	خرد کردن و قالب گیری تزریقی	دستگیره گرد دکمه ای	[۱۶۹]
۳۴	پنامهای پلی پروپیلنی	خرد کردن و مخلوط کردن با کلوخه ذغال و سیمان	کلوخه ذغال - بتن	[۱۷۰]
۳۵	پنامهای مصرف شده	پنامها ضد عفونی و خشک شد و همراه با مقاطع چوب بلوط به ضخامت ۱۰ میلی متراستفاده شد	صدا گیر در ساختمانها	[۱۷۱]
۳۶	پنام‌های پلی‌پروپیلنی	کربنی کردن، فعال‌سازی، فلورینه کردن	الکترودهای ابرخازن	[۱۷۲]
۳۷	پنام های پزشکی	ابتدا با یک امین فعال می‌شوند سپس سولفونه شده و در محیط آرگون در کوره کربنی می‌شوند.	آند در باطریهای لیتیومی	[۱۷۳]
۳۸	پنامهای پلی پروپیلن	پس از خارج کردن سیم، پنام خرد شده و با کربن فعال مخلوط و در دمای ۳۳۰ درجه سلسیوس قرار گرفت	کربن فعال متخلخل بسته	[۱۷۴]
۳۹	پنام های پزشکی	پنامها سوزانده شده و خاکستر آن به هیدروکسی متیل پروپیل سلولوز در آب افزوده شد و فیلم تهیه گردید	فیلم مالچ در کشاورزی	[۱۷۵]
۴۰	پنامهای پلی پروپیلن	پس ار خرد کردن ۰/۵ درصد به سیمان اضافه شد.	بتن مقاوم به حرارت تا ۸۰۰ درجه سلسیوس	[۱۷۶]

۶ تولیدات سوخت از پنام‌ها

یک مقاله مروری به بررسی تبدیل شیمیایی-حرارتی پسماندهای ناشی از شیوع بیماری کرونا، شامل پَنام، دستکش، سرنگ، روپوش و سایر موارد مشابه پرداخته است. روش‌های حرارتی-شیمیایی توأمان، شامل سوزاندن، برشته‌سازی، پیرولیز (آتش‌کافت) و گازی‌سازی می‌باشند [۱۷۷]. فرآیند سوزاندن معمولاً در کوره‌های مجهز به دودکش انجام شده و منجر به آلودگی هوای محیط اطراف می‌شود. برشته‌سازی در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس، مواد را خشک و نیم‌سوخته می‌کند. در فرآیند پیرولیز (آتش‌کافت)، که در دمای ۳۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس و در محیط نیتروژن صورت می‌گیرد، واکنش‌های شیمیایی سبب کاهش وزن مولکولی مواد شده و در نهایت، به تولید فرآورده‌های سوختی مایع و گازی می‌انجامد. در فرآیند گازی‌سازی که در دمای بالای ۷۰۰ درجه سلسیوس انجام می‌شود، گازهای کربن مونواکسید و دی‌اکسید تولید می‌شود. در این فرآیند، مولکول‌های بلند پلیمرها شکسته شده و به هیدروکربن‌هایی با مولکول‌های کوچک‌تر به صورت گازها، مایعات و کربن جامد تبدیل می‌شوند. گازهای تولیدی شامل کربن دی‌اکسید، متان و کربن مونواکسید خواهند بود [۱۷۷].

نویسندگان یک مقاله مروری دیگر بر این باورند که سوزاندن ضایعات وسایل محافظتی مانند پنام‌ها، اگرچه می‌تواند ویروس‌ها را از بین ببرد، اما منجر به تولید مواد اولیه ارزشمند نمی‌شود. در مقابل، روش آتش‌کافت (پیرولیز) با تبدیل این ضایعات به مواد اولیه مفید و ارزشمند، امکان بهره‌وری بیشتر را

فراهم می‌آورد و به تحقق اقتصاد دایره‌ای کمک می‌کند. در این مقاله به کشورهایی مانند کره، هند، روسیه، لیتوانی، چین و اتیوپی اشاره شده است که با استفاده از روش آتش‌کافت، محصولاتی نظیر روغن‌ها، بنزین، متان، پنتان، زغال و غیره تولید می‌کنند. در اغلب این کشورها، فرآیند آتش‌کافت در دمایی بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس انجام می‌شود [۱۷۸]. با در نظر گرفتن چالش‌های اساسیِ مرتبط با سوزاندنِ پَنام‌ها، رویکردی جایگزین مبتنی بر فرآیندهای تبخیر و تبدیل حرارتی شیمیاییِ توأم پیشنهاد شده است. این روش، با هدف تبدیل پَنام‌ها به سوخت‌های مصنوعیِ کاربردی، راهکاری نوین ارائه می‌دهد. در این میان، فرآیند تبدیل حرارتی شیمیاییِ پَنام‌ها در حضور گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) و کاتالیزور سیلیس/نیکل (Ni/SiO_2)، به عنوان روشی ایمن و موثر شناخته شده است که محصولاتی چون متان (CH_4) و هیدروکربن‌های سنگین‌تر را تولید می‌کند [۱۷۹].

یک نمونه پنام معمولیِ بدونِ بند از پلی‌پروپیلن، به‌وسیله دستگاه وزن‌سنجیِ تجزیه حرارتی (TGA) با نرخ‌هایِ متفاوتِ افزایشِ دما آزمایش شد و با دیگر تجهیزات، محصولاتِ واکنش شناسایی گردید. روابط و ثابت‌های تعیین‌کننده سرعت واکنش نیز به دست آمد. تعداد قابل‌توجهیِ از ترکیبات با وزن مولکولی کم در اثر آتش کافت در محیط نیتروژن شناسایی شد [۱۸۰]. به منظور تولید گازهای سنتزی (سنتزگاز) - که ترکیبی از گازهای گوناگون از جمله هیدروژن، کربن دی‌اکسید، کربن مونواکسید، متان و غیره است - از پَنام‌ها (FFP2) استفاده شده است. در ابتدا، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه‌های مختلف از جمله وزن‌سنج حرارتی، شناسایی شدند. سپس، واکنش حرارتی-شیمیایی (آتش‌کافت و تولید گاز) با بهره‌گیری از یک راکتور آزمایشگاهی انجام پذیرفت. مشاهده گردید که با افزایش دما، میزان گاز تولیدی افزایش یافته و همچنین ترکیبات آن دستخوش تغییر می‌شوند: متان (CH_4) بیشتر در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و هیدروژن (H_2) در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس تولید شد. گازهای موجود در محیط راکتور بر نوع گازهای تولیدی تأثیرگذار بودند. همچنین، مدلی برای واکنش‌های حرارتی-شیمیایی انجام شده، تدوین گردید [۱۸۱]. در فرآیند آتش‌کافت پَنام‌ها، از کوره‌های مایکروویو نیز استفاده شده است. به منظور افزایش کارایی این روش و ارتقای دما با استفاده از انرژی مایکروویو، کاتالیزور ارزان قیمت آهن-آلومینیوم ($FeAlO_x$) توسعه یافته و با پَنام‌ها مخلوط گردید. افزایش دما به بیش از ۹۰۰ درجه سلسیوس رسیده است [۱۸۲]. در ابتدا، اجزای تشکیل‌دهنده چند نوع پَنام از قبیل KN95 و N95 شناسایی شده و سپس، سرعت تجزیه آن‌ها با اندازه‌گیری وزن در دستگاه وزن‌سنج حرارتی مشخص شد و در نهایت، روابط تعیین‌کننده سرعت واکنش بر حسب دما به دست آمد. با این روش، ۸۹/۲۶ درصد از مواد بازیافت گردید. مواد تولیدی شامل هیدروکربن‌ها با زنجیرهای شاخه‌دار و حلقوی و همچنین گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) بود [۱۸۳].

تخریب حرارتی پیراهن، پنام و دستکش که برای محافظت از بیماری کرونا به کار می‌رود نیز انجام گرفته و محصولات شناسایی شده است. کمترین مقدار خاکستر تولیدی مربوط به پنام‌ها بود و آتش کافت بین دمای ۱۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس انجام گرفت و مایع روغنیِ تولیدی از همه پسماندها مشابهِ سوخت دیزل بود [۱۸۴]. برای تبدیل پَنام‌های پزشکی به سوخت، روش اکسایش جزئی در دماهای مختلف، هم کمتر و هم بیشتر از دمای بحرانی آب، مورد آزمایش قرار گرفته است. در دمای حدود ۴۰۰ درجه سلسیوس، روغن‌هایی به دست آمد که قابلیت تبدیل به سوخت را دارند [۱۸۵].

جدولِ ۳ نتایج خلاصه شده برخی فعالیت های دیگر برای تهیه سوخت را نشان میدهد، ملاحظه می‌شود که سوخت‌های ارزشمندی می‌توان از پنام‌ها استخراج کرد.

۷ استفاده مکرر از پنام‌ها

به منظور کاهش مصرف، برخی از پژوهشگران استفاده چندباره و پی‌درپی از ماسک‌های صورت (پَنام) را پیشنهاد کرده‌اند. بررسی مقالات و منابع علمی نشان می‌دهد که روش‌های موثر برای ضدعفونی کردن پَنام‌ها شامل استفاده از هیدروژن پراکسید، تابش فرابنفش، حرارت مرطوب یا خشک و گاز ازن است. در مقابل، استفاده از آب و صابون، اتوکلاو، پرتوهای یون‌ساز، بخار و امواج مایکروویو، روش‌های کم‌تأثیرتری شناخته شده‌اند [۱۹۵].

اگرچه استفاده مکرر از پنام‌هایِ یک‌بارمصرف از نظر احتمال شیوع بیماری پیشنهاد نمی‌شود، اما در طول همه‌گیری کرونا، به دلیل کمبود پَنام در بازار، میزان استفاده مکرر از این ماسک‌ها توسط مصرف‌کنندگان بالغ در هنگ‌کنگ بررسی شد. نتایج نشان داد که ۳۵/۴ درصد از پاسخ‌دهندگان، تا ۲۵ روز به طور مکرر از پَنام‌ها استفاده می‌کردند و برخی از آنها پیش از استفاده مجدد، اقدام به ضدعفونی کردن آن‌ها می‌نمودند [۱۹۶]. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار Qualtrics، نظرسنجی در شبکه‌های اجتماعی (فیس‌بوک، اینستاگرام، توییتر و لینکدین) در ایالات متحده آمریکا انجام شد. در این نظرسنجی، نظرات مردم درباره استفاده مجدد از پَنام‌های یک‌بارمصرف و مدیریت پسماندها در دوران همه‌گیری کووید-۱۹ جمع‌آوری گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها حاکی از آن بود که بیشتر افراد تمایل به ضدعفونی کردن و استفاده مجدد از پَنام‌ها دارند [۱۹۷].

آزمایش‌های انجام‌شده بر روی تعدادی از پَنام‌های KF94، FFE، N95 و KN95 نشان داده است که این پَنام‌ها را می‌توان بدون تغییر در ویژگی‌هایشان، چندین بار تا مجموعاً ۴۰ ساعت نیز استفاده کرد. با این حال، برخی از این پَنام‌ها پس از شستشو دیگر قابل‌استفاده مجدد نیستند. این پژوهشگران بر این باورند که استفاده مجدد از پَنام‌ها به این روش، به کاهش حجم زباله‌های تولیدی کمک می‌کند [۱۹۸].

با استفاده از روش اختصاصی انتقال به جلو لیزری، چند لایه گرافن بر روی پَنام‌های یک‌بارمصرف موجود در بازار قرار داده شد. پس از این فرآیند، مشاهده گردید که لایه بیرونی پَنام خاصیت آب‌گریزی بسیار بالایی پیدا می‌کند. همچنین، مشخص شد که اگر این پَنام در معرض نور خورشید قرار گیرد، دمای لایه رویی آن تا ۸۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد که این امر موجب نوعی خودگندزدایی می‌شود. علاوه بر این، با توجه به متخلخل بودن پَنام‌ها و خاصیت تبدیل انرژی نوری به حرارتی آن‌ها، می‌توان پس از

استفاده‌های مکرر، از آن‌ها در فرایند بازیافت برای نمک‌زدایی یا تبخیر آب محیط بهره برد [۱۹۹].

جدول ۳ محصولاتِ منتج از آتش‌کافت پنام‌ها

شماره	نوعِ دورریز	نوع پلیمر	دمای آتشکافت درجه سلسیوس	محصولات بازیافتی	شماره مرجع
۱	پنج نوع پنام	پلی‌پروپیلن، نایلونِ ۶، پنبه و پلی‌اتیلن ترفتالات	۷۰۰	CO, CO_2, THC, NO and NO_2	[۱۸۶]
۲	پنام جراحی	پنام‌های جراحی و غذای زائد	۷۰۰	گازهای (CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6, C_3H_8)، بنزین، سوختِ جت، روغن‌موتور	[۱۸۷]
۳	پنام‌های بیماران	پلی پروپیلن	۴۳۰	گازوئیل	[۱۸۸]
۴	پنام و مواد بسته‌بندی	پلی پروپیلن	۷۲۳	گاز، زغال، روغن	[۱۸۹]
۵	پنام سه‌لایه	پلی پروپیلن	۶۷۸-۷۸۳	درصد مواد فرار و پنتان	[۱۹۰]
۶	پنام معمولی	-	۸۲۳	دی‌متیل هپتان	[۱۹۱]
۷	پنام دور ریخته	پلی پروپیلن و پلی اتیلن	۸۷۳	سین گاز و هیدروکربن	[۱۸۰]
۸	مخلوط پنام و دستکش	پلی پروپیلن وپلی وینیل الکل	۶۷۳	روغن، گاز ، ذغال	[۱۹۲]
۹	مخلوط پوسته خشک بادام و پنام وآب مقطر و دریا	پنام FFP2	۳۵۰	سوخت جامد و مایع	[۱۹۳]
۱۰	پنام و کاتالیزر (Zr-Mg)	-	-	سوخت با هیدرو کربن زیاد	[۱۹۴]

پَنام‌ها در طول مدت انبارداری، مصرف و یا فرآیند گندزدایی، خاصیت الکتریسیته ساکن خود را از دست می‌دهند که این امر منجر به کاهش بازدهی آن‌ها می‌شود. برای باردار کردن مجدد پَنام‌های پلی‌پروپیلن، استفاده از مولد وان‌دوگراف پیشنهاد و مورد آزمایش قرار گرفته است. در این روش، پَنام‌ها به مدت سه دقیقه در معرض اختلاف پتانسیل ۱۰۰ کیلوولت مولد قرار می‌گیرند. در واقع، این دستگاه یک مولد الکتریسیته ساکن است که با ایجاد شدت جریان بسیار کم و اختلاف پتانسیل زیاد، برای آموزش و یادگیری اثرات الکتریسیته ساکن در موزه‌های علمی و کلاس‌های تدریس استفاده می‌شود [۲۰۰].

در یک پژوهش جدید، لایه‌ای ضد میکروب و ضد ویروس کرونا بر روی پارچه پنبه‌ای ایجاد شده است. این لایه از نانوامولسیونی از اولئیک‌اسید، اوژنول و کیتوسان تشکیل شده است. پارچه به‌دست‌آمده، ویژگی‌های لازم برای استفاده در ساختار پَنام را دارا است [۲۰۱]. همچنین، روشی برای تولید یا تبدیل پَنام‌های معمولی به گونه‌ای که بتوانند به‌طور مکرر مورد استفاده قرار گیرند و در عین حال دارای خواص ضد میکروبی و ضد ویروسی باشند، ابداع شده است. در این روش، از یک پلی‌فنل طبیعی به همراه یون‌های فلزی استفاده شده است [۲۰۲].

برای گندزدایی پَنام‌های پلی‌پروپیلن که قابلیت استفاده مجدد دارند، فناوری استفاده از کربن دی‌اکسید فوق بحرانی با نتایج رضایت‌بخشی مورد آزمایش قرار گرفته است. این روش بسیار مؤثر بوده و هیچ تأثیری بر ساختار پَنام ندارد [۲۰۳]. یک روش نسبتاً ساده و مناسب با استفاده از ماده حساس به نور اریتروزین، که توسط سازمان غذا و داروی آمریکا برای مواد غذایی تأیید شده است، ابداع شده است. این ماده قادر به تولید اکسیژن منفرد برای گندزدایی ویروس‌ها است. بافت پَنام در این روش تغییری نمی‌کند و اریتروزین به‌راحتی بر روی پَنام پاشیده می‌شود و امکان استفاده مکرر از پَنام فراهم می‌شود [۲۰۴].

پَنام‌های تجاری معمول از جنس پلی‌پروپیلن، با اکسید گرافن پوشش داده شده‌اند و با تابش امواج مادون قرمز نزدیک در هوا، پوشش اکسید گرافن متخلخل شده است. پوشش گرافن متخلخل، جاذب مواد آلی فرار است و پَنام را قابل بازیافت می‌سازد. پَنام حاصل آب‌دوست و تنفس‌پذیر شده و در اثر گرما مواد جذب‌شده را از دست می‌دهد و امکان استفاده مکرر از آن فراهم می‌شود. این روش برای تولید فیلتر نیز قابل استفاده است [۲۰۵].

برای استفاده مجدد، سه روش باردار کردن پَنام‌ها آزمایش شده است. روش‌های باردار کردن سطحی و تخلیه کرونا، به عنوان روش‌های بهینه شناخته شدند [۲۰۶]. برای تولید پَنام‌های ضد میکروب با کارایی بالا، بادوام، خود استریل‌شونده و قابل بازیافت، از پلیمر براش استفاده شده است. پلیمر ساخته‌شده با نام PPDV برگرفته از طبیعت بوده و به منظور پوشش دادن پَنام با خاصیت ضد میکروبی، مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰۷].

۸ زیست تخریب‌کردن پلاستیک‌ها

به منظور جلوگیری از تخریب محیط زیست ناشی از پلاستیک‌ها، زیست‌تخریب‌پذیر کردن آن‌ها امری ضروری است. یکی از پلاستیک‌های پرمصرف، پلی‌پروپیلن است که به‌طور گسترده در تولید پَنام‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. شواهد فیزیکی-شیمیایی متعددی نشان داده است که باسیلوس سرئوس، که از کرم موم به دست می‌آید، قادر است پلی‌پروپیلن را در محیط

تخریب کند. در این فرایند، کاهش وزن مولکولی، تشکیل گروه‌های هیدروکسیلی، کربونیلی و استری مشاهده شده است. این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که انجام تحقیقات بیشتری برای شناسایی آنزیم‌های دخیل در این تخریب ضروری است [۲۰۸].

برای تخریب پلی‌پروپیلن موجود در پَنام‌ها، استفاده از سویه باکتریایی Pseudomonas aeruginosa VJ1 با موفقیت انجام شده است. در آزمایش صورت گرفته، فیلم پلی‌پروپیلن در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و در مجاورت باکتری، به مدت ۳۰ روز در دمای ۳۷ درجه سلسیوس قرار داده شد. در این مدت، تغییرات در گروه‌های عاملی، خوردگی سطح، افزایش شاخص کربونیل و کاهش وزن اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که فیلم‌های پلی‌پروپیلن در طول ۳۰ روز، ۵/۳۷ درصد کاهش وزن داشته‌اند [۲۰۹].

۸-۱ بهبود زیست‌تخریب‌پذیری پلی‌پروپیلن از طریق اختلاط با پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر

همانطور که در بالا اشاره شد، پلی‌پروپیلن به دلیل مقاومت بالا در برابر تجزیه میکروبی، چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کند. یکی از راهکارهای امیدوارکننده برای کاهش اثرات زیست‌محیطیِ پسماندهای پلی‌پروپیلنی، از جمله پنام‌ها، و تسریع فرآیند تجزیه آن‌ها، اختلاط پلی‌پروپیلن با پلیمرهای ذاتاً زیست‌تخریب‌پذیر است [۲۱۰]. این رویکرد می‌تواند بدون تغییر بنیادین در زیرساخت‌های تولیدی موجود و با حفظ بخشی از خواص مطلوب پلی‌پروپیلن، به محصولاتی با قابلیت تجزیه بهبودیافته منجر شود.

- اختلاط پلی‌پروپیلن با پلی‌لاکتیک اسید (PLA)

پلی‌لاکتیک اسید یکی از پرکاربردترین پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر است که از منابع تجدیدپذیر مانند نشاسته ذرت یا نیشکر به دست می‌آید. اختلاط PP با PLA به منظور بهبود زیست‌تخریب‌پذیری مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته است. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن PLA به PP می‌تواند نرخ تجزیه را در شرایط کمپوست افزایش دهد، زیرا PLA به عنوان یک جزء قابل تجزیه، می‌تواند ساختار ماتریس PP را پس از تجزیه خود سست کرده و دسترسی میکروارگانیسم‌ها به PP را تسهیل نماید. با این حال، چالش اصلی در این زمینه، عدم امتزاج‌پذیری ذاتی PP (یک پلیمر آب‌گریز) و PLA (یک پلیمر نسبتاً آب‌دوست‌تر) است که می‌تواند منجر به خواص مکانیکی ضعیف در آلیاژ حاصل شود. برای غلبه بر این مشکل، استفاده از سازگارکننده‌ها مانند پلی‌پروپیلن گرافت‌شده با مالئیک انیدرید (PP-g-MA) یا کوپلیمرهای بلوکی و گرافت ضروری است تا فصل مشترک بین دو فاز پلیمری تقویت شده و پراکندگی بهتری حاصل شود [۲۱۰, ۲۱۱]. تحقیقات نشان داده‌اند که با استفاده از سازگارکننده‌های مناسب، می‌توان به آلیاژهایی با خواص مکانیکی قابل قبول دست یافت [۲۱۱].

- اختلاط پلی‌پروپیلن با نشاسته

نشاسته یک پلیمر طبیعی، ارزان، فراوان و کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر است. اختلاط نشاسته با PP به عنوان راهی برای کاهش هزینه و افزایش زیست‌تخریب‌پذیری محصولات پلی‌پروپیلنی مطرح شده است [۲۱۰, ۲۱۲]. حضور نشاسته در ماتریس PP، پس از تجزیه توسط میکروارگانیسم‌ها، می‌تواند منجر به ایجاد تخلخل و افزایش سطح تماس PP با عوامل تجزیه‌کننده شود. چالش‌های اصلی در آلیاژهای PP/نشاسته شامل جذب رطوبت بالا توسط نشاسته و کاهش خواص مکانیکی است. برای بهبود این موارد، اصلاح سطح نشاسته (مانند استری کردن یا استیله کردن) و یا استفاده از سازگارکننده‌ها برای بهبود چسبندگی بین فاز نشاسته و PP پیشنهاد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزودن حتی مقادیر کم نشاسته (مثلاً ۱۰-۳۰ درصد وزنی) می‌تواند زیست‌تخریب‌پذیری PP را در شرایط خاک یا کمپوست تسریع کند [۲۱۳].

- اختلاط پلی‌پروپیلن با پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها (PHA)

پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها (PHA) خانواده‌ای از پلی‌استرهای زیستی هستند که توسط باکتری‌های مختلف تولید می‌شوند و در طیف وسیعی از محیط‌ها (خاک، آب شیرین و شور) قابلیت تجزیه زیستی دارند. پلی‌هیدروکسی بوتیرات (PHB) و کوپلیمر آن پلی(هیدروکسی بوتیرات-کو-هیدروکسی والرآت) (PHBV) از جمله PHA های رایج هستند. آلیاژهای PP/PHA پتانسیل خوبی برای دستیابی به مواد با زیست‌تخریب‌پذیری مطلوب نشان داده‌اند. مشابه PLA، PHA نیز با PP امتزاج‌پذیری محدودی دارد و برای دستیابی به خواص بهینه، استفاده از سازگارکننده‌ها یا اصلاح یکی از اجزاء آلیاژ ممکن است ضروری باشد [۲۱۴]. مطالعات نشان داده‌اند که میزان تخریب آلیاژهای PP/PHA به طور قابل توجهی بیشتر از PP خالص است، هرچند هزینه نسبتاً بالای PHA در حال حاضر یک محدودیت برای کاربرد گسترده آن‌ها محسوب می‌شود [۲۱۵].

به‌طور کلی، هدف از اختلاط پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر با پلی‌پروپیلن، نه لزوماً دستیابی به یک محصول ۱۰۰٪ زیست‌تخریب‌پذیر در کوتاه‌مدت، بلکه ایجاد محصولاتی است که پس از دورریز، سریع‌تر از PP خالص دچار فروپاشی ساختاری شده و در نهایت به ذرات کوچک‌تری تبدیل شوند که ممکن است فرآیند تجزیه نهایی آن‌ها نیز در درازمدت تسهیل شود. با این حال، ارزیابی دقیق میزان زیست‌تخریب‌پذیری این آلیاژها در شرایط واقعی محیطی (و نه فقط آزمایشگاهی) و همچنین بررسی سرنوشت نهایی میکروپلاستیک‌های حاصل از اجزای تجزیه‌ناپذیر (مانند PP) در این آلیاژها، از اهمیت بالایی برخوردار و نیازمند تحقیقات بیشتر است.

۹ بازیابی مکانیکی پنام‌ها

بازیافت مکانیکی مواد مورد استفاده در پَنام‌ها به عنوان یک روش مورد توجه قرار گرفته است. در یک مطالعه، اجزای مختلف پَنام‌های تولید شده توسط یک شرکت تولیدی، شامل بندها، سیم و لایه‌های مختلف، به صورت دستی و با استفاده از قیچی از هم جدا شدند. قطعات جدا شده، پس از خرد شدن،

به جز بند نگه‌دارنده و سیم فلزی، توسط اکسترودر و پرس به لایه‌های نازک تبدیل شدند. سپس خواص مکانیکی و رئولوژیکی این لایه‌ها اندازه‌گیری شد تا امکان‌پذیری بازیافت مکانیکی و تبدیل پَنام‌ها به مواد صنعتی نشان داده شود. با توجه به آمارهای موجود، تنوع پَنام‌های تولیدی که بالغ بر ۱۹۶ نوع توسط ۹۴ شرکت تولیدکننده می‌رسد، ضرورت توجه به راهکارهای مکانیکی متفاوت را آشکار می‌سازد [۲۱۶].

۱۰ استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌شونده

برای کاهش میزان پسماند ناشی از پنام‌ها، برخی از پژوهشگران استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر را پیشنهاد کرده‌اند [۵۳، ۲۱۸-۲۲۰]. در یک مقاله مروری، سلولز باکتریایی به عنوان یکی از این پلیمرهای پیشنهادی مطرح شده است. خوشبختانه، سلولز باکتریایی را می‌توان به آسانی تولید نمود [۲۱۷].

همچنین، استفاده از پارچه‌های پنبه‌ای، بامبو، جوراب‌ها و زیرپوش‌های کهنه و مستعمل که به عنوان زباله دور ریخته می‌شوند، به دلیل دسترسی آسان آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. پوشاندن این پارچه‌ها با کیتوسان، روشی است که آزمایش شده و نتایج خوبی نشان داده است. این پوشش کیتوسانی به خوبی از نفوذ ذرات ریز جلوگیری می‌کند، در حالی که خود این پارچه‌های مستعمل، بازدهی مطلوبی در مهار ذرات ندارند. زمانی که کیتوسان به صورت نانوویسکر تهیه شد و بر روی پنج لایه پارچه پنبه‌ای یا فیلتر ساخته شده از پلی‌لاکتیک اسید قرار گرفت، توانست بازدهی آن را در برابر ذرات کوچکتر از ۲/۵ میکرون به میزان قابل توجه ۸۳ درصد افزایش دهد [۲۱۸]. علاوه بر این، گز روغنی که از گیاهی به همین نام استخراج می‌شود و در صنعت مواد آرایشی به خوبی شناخته شده است، برای تولید پنام‌های چند بار مصرف پنبه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، مخلوطی از لیپوزوم‌ها و گز روغنی روی پارچه‌های پنبه‌ای خالص اعمال شد و دوام و پایداری آن پس از شستشو نیز مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۱۹]. در رویکردی دیگر، لایه‌ای با استفاده از روش الکتروریسی از پلی‌لاکتیک اسید (یک پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر)، رزمارینیک اسید (ماده‌ای طبیعی) و گرافن اکساید ساخته شده است. این لایه دارای خواص مکانیکی استحکام مناسب و تخلخل مطلوب است و برای استفاده در تصفیه هوا و ساخت فیلترها مناسب است [۲۲۰].

۱۱ نظر مصرف کنندگان

تمام روش‌هایی که پیش‌تر برای کاهش اثرات زیان‌بار پنام‌ها در بخش‌های مختلف ذکر شد، همگی مرتبط با نوع پنام یا فرآیندهای اعمال شده بر روی آن‌ها بود. اما، پژوهشی قابل توجه در خصوص مصرف‌کنندگان انجام شده است که می‌تواند به کاهش مصرف پنام‌های آلوده‌کننده محیط زیست منجر شود. در این تحقیق، اطلاعات حاصل از یک نظرسنجی آنلاین از ۳۳۷ نفر با بازه سنی ۲۰ تا ۵۰ سال در کشور کره جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که راهکارهای فروش باید به گونه‌ای طراحی شوند که توجه خریداران به پنام‌هایی که کمترین آسیب را به محیط زیست وارد می‌کنند، جلب شود [۲۲۱].

۱۲ نگاه اجمالی و نتیجه‌گیری

در صفحات پیشین، به نتایج چشمگیر و قابل توجه بسیاری از محققان در کشورهای مختلف اشاره شد. تلاش‌های فراوانی در جریان بوده و همچنان ادامه دارد تا اثرات زیان‌بار پنام‌های تجزیه‌ناپذیر بر محیط زیست کاهش یابد. در این راستا، بازیابی پنام‌ها، تولید انواع مختلف آن‌ها، ایجاد اقتصاد چرخشی، تولید سوخت، استفاده مجدد، زیست‌تخریب‌پذیر کردن پنام‌ها، به‌کارگیری روش‌های مکانیکی، کاهش مصرف و تولید و استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش‌های ذکر شده ارزشمند هستند. با این حال، برای تعمیم و اجرای عملی این روش‌ها در مقیاس وسیع، باید بر اساس امکانات هر منطقه، روش مناسبی انتخاب و اجرا شود.

پنام‌ها در کاهش شدت سرایت برخی بیماری‌ها بسیار مفید هستند. به نظر می‌رسد با کاهش شدت شیوع کرونا، مصرف پنام‌ها نیز کاهش یافته باشد. اما، همچنان برای برخی افراد، به ویژه کارکنان بخش‌های مختلف خدماتی در حوزه سلامت، استفاده از لباس، پنام و دستکش بسیار رایج است. ازآنجاکه شیوع برخی بیماری‌های ریوی در هر سال معمول است، برخی پزشکان همچنان پیشنهاد می‌کنند که برای پیشگیری از گسترش این بیماری‌ها، پنام‌ها در اجتماعات و گردهمایی‌ها مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، نباید احتمال شیوع بیماری تنفسی دیگری را در آینده نادیده گرفت و لازم است از قبل آمادگی لازم را داشته باشیم.

پنام‌های یک‌بارمصرف پس از استفاده، بی‌ارزش نیستند و می‌توان از آن‌ها برای تولید انرژی و ساخت قطعات و فرآورده‌های با ارزش دیگر بهره برد. برای آنکه این پنام‌ها مفید واقع شوند و آسیب‌هایی که بسیاری به آن توجه داشته‌اند کاهش یابد، باید برنامه‌ریزی و مدیریت پسماند موثری صورت گیرد تا بتوان نتایج تحقیقات انجام شده را در سطح وسیع به مرحله عمل درآورد. وظیفه مدیریت شهری و دولت‌هاست که به دنبال راه‌های جمع‌آوری پنام‌های استفاده شده، بدون ایجاد و گسترش آلودگی باشند و زیرساخت‌های مورد نیاز را فراهم کنند. همچنین، همانطور که محققان چند کشور با تحقیقات خود تایید کرده‌اند، آموزش و آگاهی‌بخشی به عموم مردم در خصوص آسیب‌هایی که پنام‌ها به آب و هوای محیط وارد می‌کنند، وظیفه اصلی دولت‌مردان و دستگاه‌های دولتی است.

۱۲-۱ پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی

حوزه‌های تحقیقاتی مربوط به عمر مفید و پسماند پنام‌ها بسیار متنوع است و نیازمند تخصص‌های بین‌رشته‌ای است. با توجه به چالش‌های موجود و نیازهای آینده، پیشنهادهای زیر برای پژوهش‌های آتی مطرح می‌شود:

- بررسی چالش جمع‌آوری پنام‌های استفاده شده: با وجود اهمیت این موضوع، در پژوهش‌های پیشین به چالش اساسی جمع‌آوری پنام‌های استفاده شده توجه کافی نشده است. توسعه روش‌های کارآمد، ایمن و بهداشتی برای جمع‌آوری این پسماندها، بدون ایجاد و گسترش آلودگی، یک حوزه تحقیقاتی ضروری است.
- تحقیق در خصوص مکانیسم تاثیر ریزپلاستیک‌ها: لازم است مکانیسم تاثیر ریزپلاستیک‌ها (در ابعاد میکرو و نانو) ناشی از

پنام‌ها بر زندگی انسان‌ها و دیگر جانداران به صورت دقیق و علمی بررسی شود.

- کاوش در مسیرها و موضوعات ناشناخته: بیشتر گزارش‌های پژوهشی، مسیرها و موضوعات ناشناخته‌ای را برای ادامه تحقیقات نشان داده‌اند. مراجعه به این گزارش‌ها و پیگیری این مسیرها بر اساس سلیقه و تخصص علمی می‌تواند به یافته‌های جدیدی منجر شود.
- توسعه پنام‌های ایده‌آل: هدف نهایی، دستیابی به تولید پنامی با ویژگی‌های زیر است که تحقیقات مستمر در این راستا حیاتی است:
  - کیفیت بالا در فیلتراسیون
  - راحتی برای تنفس
  - خاصیت ضدویروسی موثر
  - سازگاری کامل با محیط زیست (زیست‌تخریب‌پذیری سریع و ایمن)
  - شفافیت (در صورت نیاز و کاربرد)
  - هزینه تولید پایین و قیمت ارزان

چنین پنامی باید به گونه‌ای طراحی و تولید شود که هم اکنون قابل استفاده باشد و هم در صورت بروز مجدد همه‌گیری‌هایی مانند کرونا، بتوان با امکانات کافی با آن مقابله کرد و از مرگ بی‌دلیل میلیون‌ها انسان در جهان جلوگیری نمود.

مراجع

[۱]. دهخدا علی اکبر، ۱۳۷۷، لغت نامه دهخدا. دانشگاه تهران.

[2]. Ptak, T.J., 2017. Gas filtration, in Fibrous Filter Media, Edited by Philip J. Brown, Christopher L. Cox, The Textile Institute, Woodhead Publishing.

[3]. Rockwood, C.A. and O'DONOGHUE, D.H., 1960. The surgical mask: its development, usage, and efficiency: a review of the literature, and new experimental studies. AMA Archives of Surgery, 80(6), pp.963-971.

[4]. Thomas, D., Charvet, A., Bardin-Monnier, N. and Appert-Collin, J.C., 2016. Aerosol filtration. Elsevier.

[5]. Hinds, W.C. and Zhu, Y., 2022. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons.

[6]. Baron, P.A. and Willeke, K., 2001. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications., John Wiley and Sons, Inc. 2001.

[7]. Brown, P. and Cox, C.L. eds., 2017. Fibrous filter media. Woodhead Publishing.

[8]. Mostofi, R., Wang, B., Haghighat, F., Bahloul, A. and Jaime, L., 2010. Performance of mechanical filters and respirators for capturing nanoparticles—Limitations and future direction. Industrial health, 48(3), pp.296-304.

[9]. Shaffer, R.E. and Rengasamy, S., 2009. Respiratory protection against airborne nanoparticles: a review. Journal of nanoparticle research, 11(7), pp.1661-1672.

[10]. Emi, H., 1990. Fundamentals of aerosol filtration. KONA Powder and Particle Journal, 8, pp.83-91.

[11]. Maini, S.M., Hersh, S.P. and Tucker, P.A., 1995. Barrier Fabrics for Protection against aerosols. Textile Progress, 26(1), pp.1-41.

[12]. Chua, M.H., Cheng, W., Goh, S.S., Kong, J., et al., 2020. Face masks in the new COVID-19 normal: materials, testing, and perspectives. Research., 1–40.

[13]. Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 3(7), p.e1700782.

[14]. Borrelle, S.B., Ringma, J., Law, K.L., Monnahan, C.C., et al., 2020. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. Science, 369(6510), pp.1515-1518.

[15]. Stein, R.S., 1992. Polymer recycling: opportunities and limitations. Proceedings of the National Academy of Sciences, 89(3), pp.835-838.

[16]. Vollmer, I., Jenks, M.J., Roelands, M.C., White, R.J., et al., 2020. Beyond mechanical recycling: giving new life to plastic waste. Angewandte Chemie International Edition, 59(36), pp.15402-15423.

[17]. Chanda, M., 2021. Chemical aspects of polymer recycling. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 4 (3), pp. 133-150.

[18]. D. I. Collias, M. I. James, J. M. Layman,2021, Introduction—Circular Economy of Polymers and Recycling Technologies. ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC.

[19]. Huang, J., Yan, D., Zhu, Q., Cheng, X., Tang, J., Lu, X. and Xin, J., 2023. Depolymerization of polyethylene terephthalate with glycol under comparatively mild conditions. Polymer Degradation and Stability, 208, p.110245.

[20]. Czigány, T. and Ronkay, F., 2020. Editorial corner–a personal view The coronavirus and plastics. eXPRESS polymer letters, 14(6), pp.510-511

[21]. Fadare, O.O. and Okoffo, E.D., 2020. Covid-19 face masks: A potential source of microplastic fibers in the environment. The Science of the total environment, 737, p.140279.

[22]. Almulhim, A.I., Ahmad, I., Sarkar, S. and Chavali, M., 2021. Consequences of COVID-19 pandemic on solid waste management: Scenarios pertaining to developing countries. Remediation Journal, 31(4), pp.111-121.

[23]. Blackburn, K. and Green, D., 2022. The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. Ambio, 51(3), pp.518-530.

[24]. Uddin, M.A., Afroj, S., Hasan, T., Carr, C., Novoselov, K.S. and Karim, N., 2022. Environmental impacts of personal protective clothing used to combat COVID-19. Advanced Sustainable Systems, 6(1), p.2100176.

[25]. Hantoko, D., Li, X., Pariatamby, A., Yoshikawa, K., et al.., 2021. Challenges and practices on waste management and disposal during COVID-19 pandemic. Journal of environmental management, 286, p.112140.

[26]. Vanapalli, K.R., Sharma, H.B., Ranjan, V.P., Samal, B., et al., 2021. Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. Science of the total environment, 750, p.141514.

[27]. Silva, A.L.P., Prata, J.C., Walker, T.R., Campos, D., et al., 2020. Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. Science of the Total Environment, 742, p.140565.

[28]. Czigany, T. and Ronkay, F., 2021. Plastics in the shadow of the coronavirus: Don't prohibit, teach instead!. eXPRESS Polymer Letters, 15(6), pp.490-491.

[29]. Ravindra, K., Sareen, A., Dogra, S. and Mor, S., 2024. Health risk evaluation of toxic emissions from BMW incineration treatment facilities in India. Water, Air, & Soil Pollution, 235(1), p.64.

[30]. Mohanty, M., Mohanty, J., Dey, S., Dutta, K., Shah, M.P. and Das, A.P., 2024. The face mask: A tale from protection to pollution and demanding sustainable solution. Emerging contaminants, 10(2), p.100298.

[31]. Cruz, R. C. V. D., Japson, M. J. T., Baluyot, M. H. M., 2023. Analysis of the Effects of Face Masks Disposal in the Environment at the University of Santo Tomas, International Journal of Research in Engineering, Science and Management 6 (12).

[32]. Patchaiyappan, A., Singh, A., Bautès, N. and Abimannan, A., 2024. Face mask littering in coastal environment of Coromandel beaches, a comparison between street and beach littering—perspective and perceptions. Environmental Science and Pollution Research, 31(51), pp.61270-61282.

[33]. Gorrasi, G., Sorrentino, A. and Lichtfouse, E., 2021. Back to plastic pollution in COVID times. Environmental chemistry letters, 19(1), pp.1-4.

[34]. Bastos de Sousa, F.D., 2020. Pros and Cons of Plastic during the COVID-19 Pandemic. Recycling (MDPI AG), 5(4).

[35]. Joseph, B., James, J., Kalarikkal, N. and Thomas, S., 2021. Recycling of medical plastics. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 4(3), pp.199-208.

[36]. D. Tirkaamiana, D., Angelica, C. N. R., Bobo, N. M. P., Pramesti, B. W., et al., 2021. Positive and Negative Consequences of Covid 19 Towards the Environment State, Advances in Social Science, Education and Humanities Research, volume 655, 3rd Tarumanagara International Conference on the Applications of Social Sciences and Humanities (TICASH).

[37]. Garnett, E., Balayannis, A., Hinchliffe, S., Davies, T., et al., 2022. The work of waste during COVID-19: logics of public, environmental, and occupational health. Critical Public Health, 32(5), pp.630-640.

[38]. Mallakpour, S., Behranvand, V. and Hussain, C.M., 2023. Worldwide fight against COVID-19 using nanotechnology, polymer science, and 3D printing technology. Polymer Bulletin, 80(1), pp.165-183.

[39]. Dharmaraj, S., Ashokkumar, V., Hariharan, S., Manibharathi, A., Show, P.L., Chong, C.T. and Ngamcharussrivichai, C., 2021. The COVID-19 pandemic face mask waste: a blooming threat to the marine environment. Chemosphere, 272, p.129601.

[40]. Parashar, N. and Hait, S., 2021. Plastics in the time of COVID-19 pandemic: protector or polluter?. Science of the Total Environment, 759, p.144274.

[41]. Kheirabadi, S. and Sheikhi, A., 2022. Recent advances and challenges in recycling and reusing biomedical materials. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 38, p.100695.

[42]. Yang, S., Cheng, Y., Liu, T., Huang, S., et al., 2022. Impact of waste of COVID-19 protective equipment on the environment, animals and human health: a review. Environmental Chemistry Letters, 20(5), pp.2951-2970.

[43]. Nzediegwu, C. and Chang, S.X., 2020. Improper solid waste management increases potential for COVID-19 spread in developing countries. Resources, conservation, and recycling, 161, p.104947.

[44]. Lin, C., Yang, K., Yang, L.Y., Yang, X.R., et al., 2022. Discarded masks as hotspots of antibiotic resistance genes during COVID-19 pandemic. Journal of hazardous materials, 425, p.127774.

[45]. Huang, H., Shi, Y., Gong, Z., Wang, J., et al., 2024. Revealing the characteristics of biofilms on different polypropylene plastic products: Comparison between disposable masks and takeaway boxes. Journal of Hazardous Materials, 465, p.133400.

[46]. Das, A.K., Islam, M.N., Billah, M.M. and Sarker, A., 2021. COVID-19 pandemic and healthcare solid waste management strategy–A mini-review. Science of the total environment, 778, p.146220.

[47]. Das, K.P., Sharma, D., Saha, S. and Satapathy, B.K., 2021. From outbreak of COVID-19 to launching of vaccination drive: invigorating single-use plastics, mitigation strategies, and way forward. Environmental Science and Pollution Research, 28(40), pp.55811-55845.

[48]. Tripathi, A., Tyagi, V.K., Vivekanand, V., Bose, et al. 2020. Challenges, opportunities and progress in solid waste management during COVID-19 pandemic. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2, p.100060.

[49]. Silva, A.L.P., Prata, J.C., Duarte, A.C., Barcelò, et al., 2021. An urgent call to think globally and act locally on landfill disposable plastics under and after covid-19 pandemic: Pollution prevention and technological (Bio) remediation solutions. Chemical Engineering Journal, 426, p.131201.

[50]. Benson, N.U., Bassey, D.E. and Palanisami, T., 2021. COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. Heliyon, 7(2).

[51]. Selvaranjan, K., Navaratnam, S., Rajeev, P. and Ravintherakumaran, N., 2021. Environmental challenges induced by extensive use of face masks during COVID-19: A review and potential solutions. Environmental Challenges, 3, p.100039.

[52]. Evandra, A.R.D. and Priyati, S., 2022. Legal Consequences of Disposal Mask Waste on Environment: Based on Law No. 32/2009 Concerning Environmental Protection and Management. Srawung: Journal of Social Sciences and Humanities, pp.47-53.

[53]. Rahman, M.Z., Hoque, M.E., Alam, M.R., Rouf, M.A., et al., 2022. Face masks to combat coronavirus (COVID-19)—processing, roles, requirements, efficacy, risk and sustainability. Polymers, 14(7), p.1296.

[54]. Ranjbari, M., Esfandabadi, Z.S., Gautam, S., Ferraris, A. et al., 2023. Waste management beyond the COVID-19 pandemic: Bibliometric and text mining analyses. Gondwana Research, 114, pp.124-137.

[55]. Oliveira, A.M., Silva, A.L.P., Soares, A.M., Barceló, D., et al., 2023. Current knowledge on the presence, biodegradation, and toxicity of discarded face masks in the environment. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(2), p.109308.

[56]. Mejjad, N., Farhan, R., Chakhchaoui, N., Shankhwar, N., et al., 2022. Impact of COVID-19 pandemic on plastic waste management: a bibliometric analysis by using dimension. ai. In Proceedings of the 2nd International Conference on Big Data, Modelling and Machine Learning-BML, ISBN (pp. 978-989).

[57]. Sangkham, S., 2020. Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia. Case Stud Chem Environ Eng 2: 100052.

[58]. Abbasi, S.A., Khalil, A.B. and Arslan, M., 2020. Extensive use of face masks during COVID-19 pandemic:(micro-) plastic pollution and potential health concerns in the Arabian Peninsula. Saudi journal of biological sciences, 27(12), pp.3181-3186.

[59]. Aragaw, T.A., 2020. Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario. Marine pollution bulletin, 159, p.111517.

[60]. Abdullah, S.M., 2022. The Post-pandemic Impact on Nature and the Need for Sustainable Recovery Strategies. ICR Journal, 13(2), pp.119-133.

[61]. Sutrisno, H. and Meilasari, F., 2020. Review:medical waste management for Covid19, Journal Kesehatan Lingkungan, 12. No 1.

[62]. Hamdani, A.H. and Haryanto, A.D., 2021. The face mask waste recycling generated during Covid-19 pandemic in Indonesia. Journal of Geological Sciences and Applied Geology, 5(2).

[63]. Karmilasari, V., Putri, D.S., Faedlulloh, D. and Koswara, R., 2021, December. The Danger of Environmental Damage from Disposable Mask Waste During the Covid 19 Pandemic. In 2nd International Indonesia Conference on Interdisciplinary Studies (IICIS 2021). Atlantis Press. (pp. 272-278).

[64]. Limon, M.R., Vallente, J.P.C., Cajigal, A.R.V., Aquino, M.U., et al., 2022. Unmasking emerging issues in solid waste management: Knowledge and self-reported practices on the discarded disposable masks during the COVID-19 pandemic in the Philippines. Environmental Challenges, 6, p.100435.

[65]. Alfonso, M.B., Arias, A.H., Menéndez, M.C., Ronda, A.C., et al., 2021. Assessing threats, regulations, and strategies to abate plastic pollution in LAC beaches during COVID-19 pandemic. Ocean & Coastal Management, 208, p.105613.

[66]. Simbolon, V.A., Fortuna, L., Pitriyanti, L., Erda, G. et al., 2022, October. Exploration of community knowledge and attitude on mask waste managementin the Kampung Baru Sub-District. In International Conference on Environmental Health (ICoEH) (Vol. 2, No. 1, pp. 53-61).

[67]. Botetzagias, I. and Malesios, C., 2021. Do single-use facemask users' care for the effects on the (marine) environment during the COVID-19 pandemic? Preliminary results from Greece. Marine Pollution Bulletin, 167, p.112320.

[68]. Okuku, E., Kiteresi, L., Owato, G., Otieno, K., et al., 2021. The impacts of COVID-19 pandemic on marine litter pollution along the Kenyan Coast: a synthesis after 100 days following the first reported case in Kenya. Marine Pollution Bulletin, 162, p.111840.

[69]. Abaluck, J., Kwong, L.H., Styczynski, A., Haque, A., et al., 2022. Impact of community masking on COVID-19: a cluster-randomized trial in Bangladesh. Science, 375(6577), p.eabi9069.

[70]. Rakib, M.R.J., De-la-Torre, G.E., Pizarro-Ortega, C.I., Dioses-Salinas, D.C. and Al-Nahian, S., 2021. Personal protective equipment (PPE) pollution driven by the COVID-19 pandemic in Cox's Bazar, the longest natural beach in the world. Marine pollution bulletin, 169, p.112497.

[71]. Ali, M.A., 2021. Rise in single-use plastic pollution amid COVID-19 pandemic: Bangladesh perspective. Journal of Agriculture, Food and Environment| ISSN (Online Version): 2708-5694, 2(2), pp.80-84.

[72]. Ammendolia, J., Saturno, J., Brooks, A.L., Jacobs, S. et al., 2021. An emerging source of plastic pollution: environmental presence of plastic personal protective equipment (PPE) debris related to COVID-19 in a metropolitan city. Environmental Pollution, 269, p.116160.

[73]. Thiel, M., de Veer, D., Espinoza-Fuenzalida, N.L., Espinoza, C., et al., 2021. COVID lessons from the global south–face masks invading tourist beaches and recommendations for the outdoor seasons. Science of the Total Environment, 786, p.147486.

[74]. Allison, A.L., Ambrose-Dempster, E., Domenech Aparsi, T., Bawn, et al., 2020. The environmental

dangers of employing single-use face masks as part of a COVID-19 exit strategy. UCL press.

[75]. Allison, A.L., Ambrose-Dempster, E., Bawn, M., Arredondo, et al., 2021. The impact and effectiveness of the general public wearing masks to reduce the spread of pandemics in the UK: a multidisciplinary comparison of single-use masks versus reusable face masks. UCL Open Environment, 3, p.e022.

[76]. Wu, Y., Zhang, H. and Zhang, M., 2023. Research on design strategy of mask recycling service based on behavior environment. Sustainability, 15(2), p.1065.

[77]. Y. Dong, Y., Wang, X., Sun, Liu, X., et al., 2021. Research and Countermeasure Analysis on the Post-processing Scheme of Medical Materials - taking the mask as an example, Environment, Resource and Ecology Journal, 5: 29-33.

[78]. Spennemann, D.H., 2021. COVID face masks: Policy shift results in increased littering. Sustainability, 13(17), p.9875.

[79]. Dierick, K., 2021. PNS12 can a reusable surgical face mask bring health economic and ecological benefit to a health system upon the outbreak of an emerging pathogen?. Value in Health, 24, p.S175.

[80]. Petrescu, D.C., Rastegari, H., Petrescu-Mag, I.V. and Petrescu-Mag, R.M., 2023. Determinants of proper disposal of single-use masks: knowledge, perception, behavior, and intervention measures. PeerJ, 11, p.e15104.

[81]. Amuah, E.E.Y., Agyemang, E.P., Dankwa, P., Fei-Baffoe, B., et al., 2021. Are used face masks handled as infectious waste? Novel pollution driven by the COVID-19 pandemic. Resources, conservation & recycling advances, 13, p.200062.

[82]. Campos-García, L.M., Navarrete-Rodríguez, G., Amaro-Espejo, I.A., Pulido-Martínez, A.M., et al, 2023. Social Dynamics of Face Masks as Single-Use Waste from the COVID-19 Pandemic. Enfoque UTE, 14(4), pp.35-52.

[83]. Tomaszewski, D., 2021. Waste generation as a side impact of the COVID-19 pandemic: Communication on correct disposal of single-use face masks. ScienceOpen Preprints.

[84]. Giungato, P., Moramarco, B., Rana, R.L. and Tricase, C., 2024. Carbon footprint of FFP2 protective facial masks against SARS-CoV-2 used in the food sector: effect of materials and dry sanitisation. British Food Journal, 126(1), pp.33-47.

[85]. Li, C.H., Mak, S.L., Tang, W.F., Wu, M.Y. et al., 2020, November. Development of IoT-based smart recycling machine to collect the wasted non-woven fabric face mask (NFM). In 2020 IEEE International Symposium on Product Compliance Engineering-Asia (ISPCE-CN) (pp. 1-5). IEEE.

[86]. Zand, A.D. and Heir, A.V., 2021. Emanating challenges in urban and healthcare waste management in Isfahan, Iran after the outbreak of COVID-19. Environmental Technology, 42(2), pp.329-336.

[87]. Zand, A.D. and Heir, A.V., 2021. Environmental impacts of new Coronavirus outbreak in Iran with an emphasis on waste management sector. Journal of Material Cycles and Waste Management, 23(1), pp.240-247.

[88]. Mohamadi, S., Madadi, R., Rakib, M.R.J., De-la-Torre, G.E. et al., 2023. Abundance and characterization of personal protective equipment (PPE) polluting Kish Island, Persian Gulf. Science of the Total Environment, 854, p.158678.

[89]. Hatami, T., Rakib, M.R.J., Madadi, R., De-la-Torre, G.E. et al., 2022. Personal protective equipment (PPE) pollution in the Caspian Sea, the largest enclosed inland water body in the world. Science of the Total Environment, 824, p.153771.

[90]. Akhbarizadeh, R., Dobaradaran, S., Nabipour, I., Tangestani, M., Abedi, D., Javanfekr, F., Jeddi, F. and Zendehboodi, A., 2021. Abandoned Covid-19 personal protective equipment along the Bushehr shores, the Persian Gulf: an emerging source of secondary microplastics in coastlines. Marine pollution bulletin, 168, p.112386.

[۹۱]. موسوی، س. ف، بروجنی، غ. ۱۴۰۱، ماسکهای مصرفی و چالشهای عمومی زباله های عفونی در دوره پاندمی کوید ۱۹ ، مجله علوم پزشکی دانشگاه مازندران، دوره ۳۲، ۱۲۹-۱۳۰.

[92]. Li, A.S.H., Sathishkumar, P., Selahuddeen, M.L., Mahmood, et al., 2022. Adverse environmental effects of disposable face masks due to the excess usage. Environmental Pollution, 308, p.119674.

[93]. Knicker, H. and Velasco-Molina, M., 2022. Biodegradability of disposable surgical face masks littered into soil systems during the COVID 19 pandemic—a first approach using microcosms. Soil systems, 6(2), p.39.

[94]. Litchfield, S.G., Schulz, K.G. and Kelaher, B.P., 2020. The influence of plastic pollution and ocean change on detrital decomposition. Marine Pollution Bulletin, 158, p.111354.

[95]. Litchfield, S.G., Tan, M., Schulz, K.G. and Kelaher, B.P., 2023. Disposable surgical masks affect the decomposition of Zostera muelleri. Marine pollution bulletin, 188, p.114695.

[96]. Khoironi, A., Hadiyanto, H., Hartini, E., Dianratri, I., et al., 2023. Impact of disposable mask microplastics pollution on the aquatic environment and microalgae growth. Environmental Science and Pollution Research, 30(31), pp.77453-77468.

[97]. Saliu, F., Veronelli, M., Raguso, C., Barana, D., et al., 2021. The release process of microfibers: from surgical face masks into the marine environment. Environmental Advances, 4, p.100042.

[98]. Liang, H., Ji, Y., Ge, W., Wu, J., et al., 2022. Release kinetics of microplastics from disposable face masks into

the aqueous environment. Science of The Total Environment, 816, p.151650.

[99]. Dash, H.R., Arora, M. and Khatoon, S., 2023. Evaluation of face masks as a valuable forensic DNA evidence in the post-COVID era. International Journal of Legal Medicine, 137(2), pp.311-317.

[100]. TÜRKMEN, B.A., 2021. Disposable Medical Masks: Environmental Costs.

[101]. Alfarisi, S., Sholihah, M.A., Mitake, Y., Tsutsui, Y., et al., 2022. A sustainable approach towards disposable face mask production amidst pandemic outbreaks. Sustainability, 14(7), p.3849.

[102]. Angelis-Dimakis, A., Whitehouse, A., Vyrkou, A., Hebden, A., et al., 2022. Life cycle environmental impact and economic assessment of British Wool face masks. Cleaner Environmental Systems, 6, p.100084.

[103]. Kumar, H., Azad, A., Gupta, A., Sharma, J., et al., 2021. COVID-19 Creating another problem? Sustainable solution for PPE disposal through LCA approach. Environment, Development and Sustainability, 23(6), pp.9418-9432.

[104]. Elviana, G. S. Suryadi, C. Mawardi, F. Yakob, 2022. Life Cycle Assesment of 3D Printing Filament from Disposable Mask, JICOMS, November 16, Jakarta, Indonesia,

[105]. Zhao, H., Liu, H., Wei, G., Wang, H., et al., 2021. Comparative life cycle assessment of emergency disposal scenarios for medical waste during the COVID-19 pandemic in China. Waste management (New York, NY), 126, p.388.

[106]. Spennemann, D.H., 2021. COVID-19 face masks as a long-term source of microplastics in recycled urban green waste. Sustainability, 14(1), p.207.

[107]. Priya, K.K., Thilagam, H., Muthukumar, T., Gopalakrishnan, S. et al.., 2023. Impact of microfiber pollution on aquatic biota: A critical analysis of effects and preventive measures. Science of the Total Environment, 887, p.163984.

[108]. Kavya, A.N.L., Sundarrajan, S. and Ramakrishna, S., 2020. Identification and characterization of micro-plastics in the marine environment: A mini review. Marine pollution bulletin, 160, p.111704.

[109]. Barnett, S., Evans, R., Quintana, B., Miliou, A. et al., 2021. An environmentally friendly method for the identification of microplastics using density analysis. Environmental Toxicology and Chemistry, 40(12), pp.3299-3305.

[110]. Kaur, M., Ghosh, D., Guleria, S., Arya, S.K., et al., 2023. Microplastics/nanoplastics released from facemasks as contaminants of emerging concern. Marine Pollution Bulletin, 191, p.114954.

[111]. Rathinamoorthy, R. and Raja Balasaraswathi, S., 2023. Impact of coronavirus pandemic litters on microfiber pollution—effect of personal protective equipment and disposable face masks. International Journal of Environmental Science and Technology, 20(8), pp.9205-9224.

[112]. Shukla, S., Khan, R., Saxena, A. and Sekar, S., 2022. Microplastics from face masks: a potential hazard post Covid-19 pandemic. Chemosphere, 302, p.134805.

[113]. Abadi, Z.T.R., Abtahi, B., Grossart, H.P. and Khodabandeh, S., 2021. Microplastic content of Kutum fish, Rutilus frisii kutum in the southern Caspian Sea. Science of the Total Environment, 752, p.141542.

[114]. Shen, M., Zeng, Z., Song, B., Yi, H., et al., 2021. Neglected microplastics pollution in global COVID-19: Disposable surgical masks. Science of the Total Environment, 790, p.148130.

[115]. Wang, Z., An, C., Chen, X., Lee, K., et al., 2021. Disposable masks release microplastics to the aqueous environment with exacerbation by natural weathering. Journal of hazardous materials, 417, p.126036.

[116]. Zhang, T., Zhao, C., Chen, X., Jiang, A., et al., 2023. Different weathering conditions affect the release of microplastics by masks. Environmental Science and Pollution Research, 30(24), pp.66102-66112.

[117]. Deng, L., Cai, L., Sun, F., Li, G. et al., 2020. Public attitudes towards microplastics: Perceptions, behaviors and policy implications. Resources, Conservation and Recycling, 163, p.105096.

[118]. Nelms, S.E., Barnett, J., Brownlow, A., Davison, N.J., et al., 2019. Microplastics in marine mammals stranded around the British coast: ubiquitous but transitory?. Scientific Reports, 9(1), p.1075.

[119]. Ray, S.S., Lee, H.K., Huyen, D.T.T., Chen, S.S. et al., 2022. Microplastics waste in environment: A perspective on recycling issues from PPE kits and face masks during the COVID-19 pandemic. Environmental Technology & Innovation, 26, p.102290.

[120]. Issac, M.N. and Kandasubramanian, B., 2021. Effect of microplastics in water and aquatic systems. Environmental Science and Pollution Research, 28(16), pp.19544-19562.

[121]. Wang, F., Wu, H., Li, J., Liu, J., et al., 2022. Microfiber releasing into urban rivers from face masks during COVID-19. Journal of environmental management, 319, p.115741.

[122]. Selvam, S., Manisha, A., Venkatramanan, S., Chung, S.Y. et al., 2020. Microplastic presence in commercial marine sea salts: a baseline study along Tuticorin Coastal salt pan stations, Gulf of Mannar, South India. Marine pollution bulletin, 150, p.110675.

[123]. Jiang, H., Su, J., Zhang, Y., Bian, K., et al., 2022. Insight into the microplastics release from disposable face mask: Simulated environment and removal strategy. Chemosphere, 309, p.136748.

[124]. Ma, J., Chen, F., Xu, H., Jiang, H., et al., 2021. Face masks as a source of nanoplastics and microplastics in the environment: quantification, characterization, and potential for bioaccumulation. Environmental Pollution, 288, p.117748.

[125]. Phu, H., Han, H.T.N., Thao, N.L.N. and Ha, T.T.M., 2022. Microplastics and solutions to remove microplastics in wastewater from wastewater treatment plants in the Saigon–Dong Nai river basin, Vietnam. Vietnam J. Hydrometeorol, 12(13), pp.1-13.

[126]. Jian, M., Niu, J., Li, W., Huang, Y., et al., 2022. How do microplastics adsorb metals? A preliminary study under simulated wetland conditions. Chemosphere, 309, p.136547.

[127]. Gupta, H., Kaur, S. and Singh, Z., 2022. Danio rerio as a model animal for assessing microplastic toxicity. Environ Sci Arch, 1(2), pp.98-103.

[128]. Kokalj, A.J., Dolar, A., Drobne, D., Škrlep, L., et al., 2022. Effects of microplastics from disposable medical masks on terrestrial invertebrates. Journal of hazardous materials, 438, p.129440.

[129]. Jemec Kokalj, A., Dolar, A., Drobne, D., Marinšek, M., et al., 2022. Environmental hazard of polypropylene microplastics from disposable medical masks: acute toxicity towards Daphnia magna and current knowledge on other polypropylene microplastics. Microplastics and nanoplastics, 2(1), p.1.

[130]. Kim, L., Kwak, J.I., Kim, S.A. and An, Y.J., 2023. Potential effects of natural aging process on the characteristics and toxicity of facial masks: A zebrafish-based study. Journal of Hazardous Materials, 453, p.131425.

[131]. Zhao, X., Gao, P., Zhao, Z., Wu, Y., et al., 2024. Microplastics release from face masks: Characteristics, influential factors, and potential risks. Science of the Total Environment, 921, p.171090.

[132]. Le, V.G., Nguyen, M.K., Lin, C., Nguyen, H.L., et al., 2024. Review on personal protective equipment: Emerging concerns in micro (nano) plastic pollution and strategies for addressing environmental challenges. Environmental Research, 257, p.119345.

[133]. Song, J., Chen, X., Li, S., Tang, H., et al., 2024. The environmental impact of mask-derived microplastics on soil ecosystems. Science of the Total Environment, 912, p.169182.

[134]. Barari, F., Gabrabad, M.E. and Bonyadi, Z., 2024. Recent progress on the toxic effects of microplastics on Chlorella sp. in aquatic environments. Heliyon, 10(12).

[135]. Ilyas, S., Srivastava, R.R. and Kim, H., 2020. Disinfection technology and strategies for COVID-19 hospital and bio-medical waste management. Science of the Total Environment, 749, p.141652.

[136]. Asim, N., Badiei, M. and Sopian, K., 2021. Review of the valorization options for the proper disposal of face masks during the COVID-19 pandemic. Environmental technology & innovation, 23, p.101797.

[137]. Ahmed, W. and Lim, C.W., 2022. Effective recycling of disposable medical face masks for sustainable green concrete via a new fiber hybridization technique. Construction and Building Materials, 344, p.128245.

[138]. Crespo, C., Ibarz, G., Sáenz, C., Gonzalez, P. et al., 2021. Study of recycling potential of FFP2 face masks and characterization of the plastic mix-material obtained. A way of reducing waste in times of Covid-19. Waste and Biomass Valorization, 12(12), pp.6423-6432.

[139]. Kim, S., Yang, X., Yang, K., Guo, H., et al., 2022. Recycling respirator masks to a high-value product: from COVID-19 prevention to highly efficient battery separator. Chemical Engineering Journal, 430, p.132723.

[140]. Kim, S., Yang, X., Yang, K., Guo, H., Cho, M., Kim, Y.J. and Lee, Y., 2022. Recycling respirator masks to a high-value product: from COVID-19 prevention to highly efficient battery separator. Chemical Engineering Journal, 430, p.132723.

[141]. Fatmala, R.I., Yulianti, I. and Fianti, F., 2022. Recycling Surgical Mask as Acoustic Panel using Hand Lay-Up Methods. Physics Communication, 6(1), pp.30-36.

[142]. Binti Dolmat, N.L. and Sabri, N.A.B.M., 2022. Green recycling approach to produce heavy duty kids chair from face mask waste. International Journal Of Technical Vocational And Engineering Technology, 3(1), pp.30-35.

[143]. Maderuelo-Sanz, R., Acedo-Fuentes, P., García-Cobos, F.J., Sánchez-Delgado, et al., 2021. The recycling of surgical face masks as sound porous absorbers: Preliminary evaluation. Science of The Total Environment, 786, p.147461.

[144]. Xu, W., Yin, Z.Y., Wang, H.L. and Wang, X., 2022. Experimental study on the monotonic mechanical behavior of completely decomposed granite soil reinforced by disposable face-mask chips. Journal of cleaner production, 352, p.131528.

[145]. Varghese P. J, G., David, D.A., Karuth, A., Manamkeri Jafferali, J.F., et al., 2022. Experimental and simulation studies on nonwoven polypropylene–nitrile rubber blend: recycling of medical face masks to an engineering product. ACS omega, 7(6), pp.4791-4803.

[146]. Aqiila, R. S., Asri, R. A. M., Wibowo, S. Y. M., Salsabilaa, D. A., 2022. Hidayati, ECOMASK: Solution to Overcome Mask Waste within the Scope of Pesantren, Conference Proceeding, I Jurecon.

[147]. Wirawan, I P. A. P. , Wiryadi, I. G. G., Mahardika, I. B. G., 2021. Characteristics of Paving Blocks with Addition of Mask Waste Fiber, Proceeding 5th International Conference on Sustainable Development.

[148]. Moreira, B.R.D.A., Cruz, V.H., Barbosa Junior, M.R., Meneses, M.D., et al., 2024. Agro-residual biomass and disposable protective face mask: a merger for converting waste to plastic-fiber fuel via an integrative carbonization-pelletization framework. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(12), pp.12785-12806.

[149]. Koniorczyk, M., Bednarska, D., Masek, A. and Cichosz, S., 2022. Performance of concrete containing recycled masks used for personal protection during coronavirus pandemic. Construction and Building Materials, 324, p.126712.

[150]. Idrees, M., Akbar, A., Mohamed, A.M., Fathi, D. et al.., 2022. Recycling of waste facial masks as a construction material, a step towards sustainability. Materials, 15(5), p.1810.

[151]. Pulikkalparambil, H., Nandi, D., Rangappa, S.M., Prasanth, S. et al., 2022. Polymer composites from natural fibers and recycled waste surgical masks during COVID-19 pandemic. Polymer Composites, 43(6), pp.3944-3950.

[152]. Saberian, M., Li, J., Kilmartin-Lynch, S. and Boroujeni, M., 2021. Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase. Science of the Total Environment, 769, p.145527.

[153]. Zhang, D., Guo, Y., Liu, Z., Xu, P., et al., 2023. Laboratory investigation on added-value application of the COVID-19 disposable mask in hot mix asphalt (HMA). Science of the Total Environment, 860, p.160243.

[154]. Ramasamy, R. and Subramanian, R.B., 2023. Recycling of disposable single-use face masks to mitigate microfiber pollution. Environmental Science and Pollution Research, 30(17), pp.50938-50951.

[155]. Hu, X., Chen, M., Hu, B., Du, G. et al., 2023. Experimental study on the mechanical behavior of sandy soil reinforced by disposable face mask chips under different stress paths. Sustainability, 15(5), p.4059.

[156]. Xiang, M., Zhou, Y., Yang, J., Lu, T., et al., 2022. Conductive polymer composites fabricated by disposable face masks and multi-walled carbon nanotubes: Crystalline structure and enhancement effect. Journal of Renewable Materials, 10(3), p.821.

[157]. Choudhary, R., Mukhija, A., Sharma, S., Choudhary, et al., 2023. Energy-saving COVID–19 biomedical plastic waste treatment using the thermal-Catalytic pyrolysis. Energy, 264, p.126096.

[158]. Stewart, D.J., Fisher, L.V., Warwick, M.E., Thomson, D. et al., 2022. Facemasks and ferrous metallurgy: improving gasification reactivity of low-volatile coals using waste COVID-19 facemasks for ironmaking application. Scientific Reports, 12(1), p.2693.

[159]. Mawardi, C., Suryadi, G., Elviana, E. et al., 2022, December. 3D Printing Object Using Recycled Disposable Masks Filament. In Proceedings of the First Jakarta International Conference on Multidisciplinary Studies Towards Creative Industries, JICOMS 2022 (Vol. 16).

[160]. Goli, A. and Sadeghi, P., 2023. Evaluation on the use of COVID-19 single-use face masks to improve the properties of hot mix asphalt. Road Materials and Pavement Design, 24(5), pp.1371-1388.

[161]. Yu, X., Chen, G., Widenmeyer, M., Kinski, I., et al., 2023. Catalytic recycling of medical plastic wastes over La0. 6Ca0. 4Co1–xFexO3− δ pre-catalysts for co-production of H2 and high-value added carbon nanomaterials. Applied Catalysis B: Environmental, 334, p.122838.

[162]. Sreńscek-Nazzal, J., Serafin, J., Kamińska, A., Dymerska, A., et al., 2022. Waste-based nanoarchitectonics with face masks as valuable starting material for high-performance supercapacitors. Journal of Colloid and Interface Science, 627, pp.978-991.

[163]. Munada, D.I., Sa'id, A.U., Juniarianto, A.S., Luthfi, et al., 2024, June. Synthesis of Composite Photocatalyst Derived from Medical Mask Waste/TiO2 for Degradation of Rhodamine-B Textile Waste. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2780, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.

[164]. Xiang, M., Yang, R., Zhuang, H., Wu, J., et al., 2023. Electromagnetic interference shielding composites obtained from waste face masks, MXene and polyethylene terephthalate micro plastics. Journal of Hazardous Materials Advances, 12, p.100365.

[165]. Fu, Z., Zhang, Y.S., Ji, G. and Li, A., 2023. The interactions between mixed waste from discarded surgical masks and face shields during the degradation in supercritical water. Journal of Hazardous Materials, 459, p.132338.

[166]. Dissanayake, D.G.K., Gunawardane, S.D., Weerasinghe, D., Tissera, N. et al., 2022, November. Mechanical Recycling and Valorisation of Disposable Face Masks: A Potential Solution to the COVID-19 Waste Issue. In International Conference on Sustainable Built Environment (pp. 101-113). Singapore: Springer Nature Singapore.

[167]. Kolya, H. and Kang, C.W., 2023. A new approach for agricultural water management using pillows made from Covid-19 waste face masks and filled with a hydrogel polymer: preliminary studies. Agriculture, 13(1), p.152.

[168]. S. Suryawanshi, S., Akhade, S.i.,Kolate, T. , Chikute, Dr.G.C., 2024. Evaluating The Performance Of Concrete Made Using Surgical Mask As Fibre Reinforcement, Alochana Journal Volume 13 Issue 5.

[169]. Annabila, M.A., Widiastuti, I. and Estriyanto, Y., 2023. Optimizing the Injection Molding Parameters of Mask Waste Recycling into Door Knob Products. In E3S Web of Conferences (Vol. 465, p. 01015). EDP Sciences.

[170]. Yang, Y., Xin, C., Sun, Y., Di, J., et al., 2024. Experimental study on the mechanical properties of disposable mask waste–reinforced gangue concrete. Materials, 17(4), p.948.

[171]. Jang, E.S., 2024. The performance of interior building sound-absorbing material of cross-sectional oak (Quercus spp.) in combination with disposable mask waste (DMW). Applied Acoustics, 216, p.109802.

[172]. Lee, U.W., Baik, J.H., Lee, S.G. and Kang, H.S., 2024. Transforming polymeric air filters into high-performance supercapacitor electrodes through carbonization and fluorination. Surfaces and Interfaces, 46, p.104061.

[173]. Gyudong, M., Hyeongju, Y. and Minjae, K., 2024. Recycling disposable masks as a conductive additive for silicon. Carbon Letters, 34(1), pp.303-313.

[174]. Zhang, S., Sun, N., Li, X., Soomro, R.A. and Xu, B., 2024. Closed pore engineering of activated carbon enabled by waste mask for superior sodium storage. Energy Storage Materials, 66, p.103183.

[175]. Mahendran, R., Dhanabal, R., Cifuentes-Faura, J., Srinivasan, S. et al., 2024. Exploration and Analysis of Biodegradable Polymeric Films Reinforced with Surgical Face Masks Ash. Chemistry Africa, 7(2), pp.813-822.

[176]. Durmuş, G., Çelik, D.N., Demircan, R.K. and Kaplan, G., 2023. Effect of waste COVID-19 face masks on self-compacting high-strength mortars exposed to elevated temperature. Ain Shams Engineering Journal, 14(8), p.102058.

[177]. Purnomo, C.W., Kurniawan, W. and Aziz, M., 2021. Technological review on thermochemical conversion of COVID-19-related medical wastes. Resources, Conservation and Recycling, 167, p.105429.

[178]. Debnath, B., Ghosh, S. and Dutta, N., 2022. Resource resurgence from COVID-19 waste via pyrolysis: a circular economy approach. Circular Economy and Sustainability, 2(1), pp.211-220.

[179]. Sun, S., Yuan, Y., Chen, R., Xu, X. and Zhang, D., 2021. Kinetic, thermodynamic and chemical reaction analyses of typical surgical face mask waste pyrolysis. Thermal Science and Engineering Progress, 26, p.101135.

[180]. Jung, S., Lee, S., Dou, X. and Kwon, E.E., 2021. Valorization of disposable COVID-19 mask through the thermo-chemical process. Chemical Engineering Journal, 405, p.126658.

[181]. Foffi, R., Savuto, E., Stante, M., Mancini, R. et al., 2022. Study of energy valorization of disposable masks via thermochemical processes: devolatilization tests and simulation approach. Energies, 15(6), p.2103.

[182]. Yuwen, C., Liu, B., Rong, Q., Hou, K., et al., 2023. Mechanism of microwave-assisted iron-based catalyst pyrolysis of discarded COVID-19 masks. Waste Management, 155, pp.77-86.

[183]. Montero-Calderón, C., Tacuri, R., Solís, H., De-La-Rosa, A., et al., 2023. Masks thermal degradation as an alternative of waste valorization on the COVID-19 pandemic: A kinetic study. Heliyon, 9(2).

[184]. Ramalingam, S., Thamizhvel, R., Sudagar, S. and Silambarasan, R., 2023. Production of third generation bio-fuel through thermal cracking process by utilizing Covid-19 plastic wastes. Materials Today: Proceedings, 72, pp.1618-1623.

[185]. Xiu, F.R., Zhan, L., Qi, Y., Wu, T. et al., 2024. Upcycling of waste disposable medical masks to high value-added gasoline fuel and surfactants products by sub/supercritical water degradation and partial oxidation. Journal of Hazardous Materials, 476, p.134950.

[186]. Brillard, A., Kehrli, D., Douguet, O., Gautier, K., et al., 2021. Pyrolysis and combustion of community masks: Thermogravimetric analyses, characterizations, gaseous emissions, and kinetic modeling. Fuel, 306, p.121644.

[187]. Park, C., Choi, H., Lin, K.Y.A., Kwon, E.E. et al., 2021. COVID-19 mask waste to energy via thermochemical pathway: Effect of Co-Feeding food waste. Energy, 230, p.120876.

[188]. Sari, M.M., Inoue, T., Salsabilla, V.C., Septiariva, I.Y., et al., 2024. Transforming disposable masks to sustainable gasoline-like fuel via pyrolysis. Environmental Advances, 15, p.100466.

[189]. Dharmaraj, S., Ashokkumar, V., Pandiyan, R., Munawaroh, H.S.H., et al., 2021. RETRACTED: Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes. Chemosphere, 275, p.130092.

[190]. Yousef, S., Eimontas, J., Striūgas, N. and Abdelnaby, M.A., 2021. Pyrolysis kinetic behaviour and TG-FTIR-GC–MS analysis of coronavirus face masks. Journal of analytical and applied pyrolysis, 156, p.105118.

[191]. Lee, S.B., Lee, J., Tsang, Y.F., Kim, Y.M., et al., 2021. Production of value-added aromatics from wasted COVID-19 mask via catalytic pyrolysis. Environmental Pollution, 283, p.117060.

[192]. Aragaw, T.A. and Mekonnen, B.A., 2021. Current plastics pollution threats due to COVID-19 and its possible mitigation techniques: a waste-to-energy conversion via Pyrolysis. Environmental Systems Research., 10 (1), 8.

[193]. Remón, J., Zapata, G., Oriol, L., Pinilla, J.L. et al., 2022. A novel 'sea-thermal', synergistic co-valorisation approach for biofuels production from unavoidable food waste (almond hulls) and plastic residues (disposable face masks). Chemical Engineering Journal, 449, p.137810.

[194]. Jiang, H., Yang, C., Song, J., Li, Y., et al., 2024. Conversion of waste mask into hydrocarbon-rich fuels through catalytic pyrolysis with Zr-Mg bimetallic catalyst under N2/CO2 atmosphere. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 178, p.106410.

[195]. Rubio-Romero, J.C., del Carmen Pardo-Ferreira, M., Torrecilla-García, J.A. and Calero-Castro, S., 2020. Disposable masks: Disinfection and sterilization for reuse, and non-certified manufacturing, in the face of shortages during the COVID-19 pandemic. Safety science, 129, p.104830.

[196]. Lee, L.Y.K., Chan, I.C.W., Wong, O.P.M., Ng, Y.H.Y., et al.., 2021. Reuse of face masks among adults in Hong Kong during the COVID-19 pandemic. BMC public health, 21(1), p.1267.

[197]. Rodriguez Morris, M.I., Kontar, W. and Hicks, A.L., 2024. Use, reuse, and waste management of single-use products associated with the COVID-19 pandemic in the United States. Integrated Environmental Assessment and Management, 20(5), pp.1736-1746.

[198]. Chen, H., Samet, J.M., Tong, H., Abzhanova, A., et al., 2022. Can disposable masks be worn more than once?. Ecotoxicology and Environmental Safety, 242, p.113908.

[199]. Zhong, H., Zhu, Z., Lin, J., Cheung, C.F., et al., 2020. Reusable and recyclable graphene masks with outstanding superhydrophobic and photothermal performances. ACS nano, 14(5), pp.6213-6221.

[200]. Sugihara, K., 2021. Recharging N95 masks using a van de Graaff generator for safe recycling. Soft Matter, 17(1), pp.10-15.

[201]. Punjabi, K., Bhatia, E., Keshari, R., Jadhav, K., et al., 2023. Biopolymer coating imparts sustainable self-disinfecting and antimicrobial properties to fabric: translated to protective gears for the pandemic and beyond. ACS Biomaterials Science & Engineering, 9(2), pp.1116-1131.

[202]. Wang, X., Hu, T., Hu, B., Liu, Y., et al., 2022. Imparting reusable and SARS-CoV-2 inhibition properties to standard masks through metal-organic nanocoatings. Journal of hazardous materials, 431, p.128441.

[203]. Santos-Rosales, V., López-Iglesias, C., Sampedro-Viana, A., Alvarez-Lorenzo, C., et al., 2022. Supercritical CO2 sterilization: An effective treatment to reprocess FFP3 face masks and to reduce waste during COVID-19 pandemic. Science of the Total Environment, 826, p.154089.

[204]. Jiang, Y., Fu, Y., Xu, X., Guo, X., et al., 2023. Production of singlet oxygen from photosensitizer erythrosine for facile inactivation of coronavirus on mask. Environment International, 177, p.107994.

[205]. Cheng, J., Tang, S., Lin, Z., Wang, Z., et al., 2024. Wearable textile with laser-induced hydrophilic porous graphene oxide coating for rapid adsorption of volatile organic compounds. Applied Surface Science, 648, p.159073.

[206]. Peng, Z., Zhang, Z., Wang, Y. and Yang, Z., 2023, December. Electrostatic Charge Injection for Sustainable Face Mask Reuse: Mechanisms and Performance Enhancement. In 2023 IEEE 22nd International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS) (pp. 88-90). IEEE.

[207]. Luo, X., Yin, C., Ji, L., Feng, J., et al., 2023. An antimicrobial polymer brush coating to fabricate high-performance, durable, self-sterilization, and recyclable face masks. Chemistry of Materials, 35(21), pp.9245-9256.

[208]. Nyamjav, I., Jang, Y., Park, N., Lee, Y.E. et al., 2023. Physicochemical and structural evidence that Bacillus cereus isolated from the gut of waxworms (Galleria mellonella larvae) biodegrades polypropylene efficiently in vitro. Journal of Polymers and the Environment, 31(10), pp.4274-4287.

[209]. Vijayalakshmi, S., Gopalsamy, P., Muthusamy, K., Sundarraj, et al., 2022. Environmental Hazard of Polypropylene from Disposable Face Masks Linked to the COVID-19 Pandemic and Its Possible Mitigation Techniques through a Green Approach. Journal of chemistry, 2022(1), p.9402236.

[210]. Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Arkatkar, A., Doble, et al., 2008. Biodegradation of polyethylene and polypropylene. Indian Journal of Biotechnology, 7(1), p.9.

[211]. Codou, A., Anstey, A., Misra, M. and Mohanty, A.K., 2018. Novel compatibilized nylon-based ternary blends with polypropylene and poly (lactic acid): Morphology evolution and rheological behaviour. RSC advances, 8(28), pp.15709-15724.

[212]. Griffin, G.J.L., 1994. Starch polymer blends, Chemistry & Industry-London.

[213]. Chandra, R.U.S.T.G.I. and Rustgi, R., 1998. Biodegradable polymers. Progress in polymer science, 23(7), pp.1273-1335.

[214]. Reddy, M.M., Vivekanandhan, S., Misra, M., Bhatia, S.K. et al., 2013. Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities. Progress in polymer science, 38(10-11), pp.1653-1689.

[215]. Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A. and Alvarez, V.A., 2014. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging.

[216]. Battegazzore, D., Cravero, F. and Frache, A., 2020. Is it possible to mechanical recycle the materials of the disposable filtering masks?. Polymers, 12(11), p.2726.

[217]. Sharma, P., Mittal, M., Yadav, A. and Aggarwal, N.K., 2023. Bacterial cellulose: nano-biomaterial for biodegradable face masks–a greener approach towards environment. Environmental nanotechnology, monitoring & management, 19, p.100759.

[218]. Lee, M., Hwang, S.Y., Koo, J.M., Jeon, H., et al., 2023. Chitosan Coating in the Form of Polymer and Nanowhiskers on Clothing Fabrics for Improved Particulate Matter Removal Efficiency in Face Mask Filters. Journal of Natural Fibers, 20(1), p.2187507.

[219]. KARTAL, G.E., 2023. Transferring liposomes containing moisturizing moringa oil to washable masks. 2023 (Volume: 30), 129.

[220]. Liu, C., Du, G., Guo, Q., Li, R., et al., 2023. Synergistic antibacterial performance of rosemarinic acid-graphene oxide in electrospun polylactic acid membranes for air filtration. Journal of Polymer Research, 30(12), p.448.

[221]. Lee, S.E., Kim, S.J., Oh, K.W. and Lee, K.H., 2022. Purchase intention toward sustainable masks after COVID-19: the moderating role of health concern. Fashion and Textiles, 9(1), p.43.