Review Article

Polymerization
Quarterly, 2026
Volume 16, Number 1
Pages 42-52
ISSN: 2252-0449

Challenges, Advances, and Future Directions of Polyamide Recycling

Afshin Pourshaban* and Ghasem Naderi
Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 12 September 2025, Accepted: 24 February 2026

Abstract

The rapid growth of plastic production and consumption, accompanied by severe environmental consequences such as long-term waste accumulation, soil and water pollution, and the release of microplastics, clearly demonstrates that the linear model of "extraction–production–disposal" is no longer viable. Therefore, the transition to a circular economy is not merely a technological choice, but an undeniable necessity for environmental sustainability and resource security. Meanwhile, polyamides (PA) play a vital role in the packaging, textile, automotive, and engineering parts industries with their outstanding mechanical properties, heat resistance and chemical stability. However, the long lifespan and non-biodegradability of these polymers have created serious challenges for waste management. This article focuses on the mechanical recycling of polyamides, examining common and advanced recycling routes, structural features, and the most important secondary applications. Analysis of existing studies shows that parameters such as the number of reprocessing cycles, the composition and quality of the input feed, moisture content, processing conditions, and the use of compatibilizer additives have a direct impact on maintaining the strength and durability of the recycled product. Although mechanical recycling has advantages such as simplicity, lower energy consumption, and avoidance of direct greenhouse gas emissions, issues such as polymer chain degradation due to repeated melt-processing and incompatibility with other polymers persist. Investment in advanced separation and compatibilization technologies, along with the development of innovative markets for recycled products, can be a practical step towards reducing dependence on virgin resources and achieving the goals of the circular economy.

Key Words

**polyamide,
recycling,
circular economy,
mechanical properties,
environmental sustainability**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E–mail: a.pourshaban@ippi.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال شانزدهم، شماره ۱،
صفحه ۵۲-۴۲، ۱۴۰۵
ISSN: 2252-0449

چالش‌ها، پیشرفت‌ها و مسیرهای آینده بازیافت پلی‌آمیدها

افشین پورشبان* و قاسم نادری

تهران، پژوهشگاه پتروشیمی و پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۵

چکیده

رشد شتابان تولید و مصرف پلاستیک‌ها، که با پیامدهای سنگین زیست‌محیطی چون تجمع طولانی‌مدت زباله، آلودگی خاک و آب و انتشار میکروپلاستیک‌ها همراه است، آشکار می‌سازد، تداوم مدل خطی «استخراج-تولید-دفع» به‌هیچ‌وجه پاسخ‌گو نیست. در چنین شرایطی، گذار به الگوی اقتصاد چرخشی نه صرفاً یک انتخاب فناورانه، بلکه ضرورتی انکارناپذیر برای پایداری محیط‌زیست و امنیت منابع به‌شمار می‌رود. دراین‌میان، پلی‌آمیدها (PA) با داشتن خواص برجسته مکانیکی، مقاومت گرمایی و پایداری شیمیایی، نقش حیاتی در صنایع بسته‌بندی، نساجی، خودروسازی و قطعات مهندسی ایفا می‌کنند. بااین‌حال، طول عمر زیاد و زیست‌تخریب‌ناپذیری این پلیمرها، چالش‌های جدی برای مدیریت پسماند ایجاد کرده است. این مقاله با تمرکز بر بازیافت مکانیکی پلی‌آمیدها، مسیرهای رایج و پیشرفته بازیافت، ویژگی‌های ساختاری و مهم‌ترین کاربردهای ثانویه را بررسی می‌کند. تحلیل مطالعات موجود نشان می‌دهد، پارامترهایی چون تعداد دفعات بازفراوری، ترکیب و کیفیت خوراک ورودی، رطوبت، شرایط فراوری و کاربرد افزودنی‌های سازگارساز، اثر مستقیمی بر حفظ استحکام و دوام محصول بازیافتی دارند. هرچند بازیافت مکانیکی مزایایی مانند سادگی، کاهش انرژی و پرهیز از انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای دارد، اما مسائلی نظیر تخریب زنجیر پلیمری در اثر فرایند ذوب مکرر و ناسازگاری با سایر پلیمرها پابرجاست. سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین جداسازی و سازگارسازی به‌همراه توسعه بازارهای جدید برای محصولات بازیافتی، می‌تواند گام عملی در مسیر کاهش وابستگی به منابع بکر و تحقق اهداف اقتصاد چرخشی باشد.



افشین پورشبان



قاسم نادری

واژگان کلیدی

پلی‌آمید،
بازیافت،
اقتصاد چرخشی،
خواص مکانیکی،
پایداری زیست‌محیطی

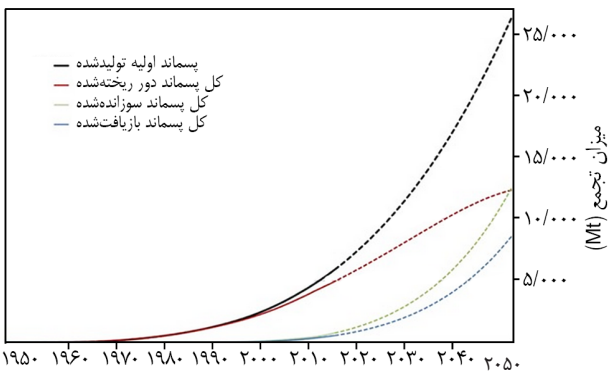
* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
a.pourshaban@ippi.ac.ir

مقدمه

اهمیت پلاستیک‌ها در جامعه معاصر انکارناپذیر است و پیش‌بینی نمی‌شود که مصرف آن‌ها در آینده کاهش یابد. از آغاز تولید صنعتی تا سال ۲۰۱۹، بیش از Mt ۹ پلاستیک بکر تولید شده است [۱]. در سال ۲۰۲۲ این مقدار تنها در یک سال به بیش از Mt ۴۰۰ رسید. پلی‌اولفین‌ها شامل پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن، بیشترین سهم را در مصرف گرمانرم‌ها دارند و بسته‌بندی، بزرگ‌ترین بازار مصرف آن‌ها در اروپاست [۲،۳].

تا پیش از سال ۱۹۸۰ تقریباً تمام پسماندهای پلاستیکی بدون هیچ‌گونه بازیافت یا سوزاندن دور ریخته می‌شدند، زیرا این دو روش عملاً سهم ناچیزی داشتند. از دهه ۱۹۸۰، سوزاندن به‌عنوان روش مدیریت پسماند پلاستیک رواج یافت و از دهه ۱۹۹۰، بازیافت نیز به‌تدریج جایگاه بیشتری پیدا کرد. در سال ۲۰۱۵، مجموع پسماند پلاستیک تولیدشده در جهان به حدود Mt ۶۳۰۰ رسید که تنها حدود ۹ درصد آن بازیافت و نزدیک به ۱۲ درصد سوزانده شد و تقریباً ۷۹ درصد در محل‌های دفن زباله یا در محیط‌زیست تجمع یافت [۴]. در میان این سه گزینه دفع، سوزاندن تنها مسیری است که پسماند پلاستیک را به‌طور دائمی حذف می‌کند، زیرا این فرایند برپایه احتراق در دماهای زیاد انجام می‌گیرد. شکل ۱، میزان تجمعی تولید و روش‌های دفع پسماند پلاستیک را نشان می‌دهد [۵].

بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع تجدیدناپذیر و دفع گسترده ضایعات پلاستیکی در محل‌های دفن به بحران جدی زیست‌محیطی جهانی انجامیده است. این موضوع نشان می‌دهد، مدل خطی سنتی استخراج-تولید-دفع دیگر پایدار نیست و گذار به اقتصاد چرخشی ضرورت دارد. اقتصاد چرخشی بر کاهش و بازگردانی منابع طبیعی با اهدافی چون کاهش گازهای گلخانه‌ای، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بازطراحی محصولات، کاهش ضایعات، استفاده بهینه



شکل ۱- میزان تجمعی تولید و روش‌های دفع پسماند پلاستیک [۵].

از منابع و افزایش طول عمر محصولات تأکید دارد [۲،۳].

پلی‌آمیدها یا نایلون‌ها، خانواده چندکاره از گرمانرم‌های نیمه‌بلوری با منشأ عمدتاً نفتی‌اند که از مونومرهایی چون هگزامتیلن دی‌آمین (HMDA)، آدیپیک اسید (AA) و کاپرولاکتام (CPL) تولید می‌شوند. این مواد به‌دلیل استحکام مکانیکی، شفافیت، خواص گرمایی و سدی در تولید الیاف، قطعات مکانیکی و الکتریکی و بسته‌بندی انعطاف‌پذیر کاربرد گسترده دارند و حدود ۵/۱ درصد از مصرف جهانی پلاستیک را تشکیل می‌دهند [۶،۷]. هرچند سهم آن‌ها کم به‌نظر می‌رسد، اما حجم تولید درخورتوجهی را شامل می‌شود. با پیش‌بینی رشد بازار جهانی تا Mt ۴/۱۰ در سال ۲۰۲۷، چالش جدی در پایداری ایجاد می‌کنند، چراکه ضایعات آن‌ها به‌دلیل پیوندهای کووالانسی قوی و بلورینگی زیاد در شرایط معمول محیطی به‌سختی تجزیه‌پذیرند. پلی‌آمیدها به‌منظور بهره‌گیری از ویژگی‌هایی چون مقاومت گرمایی، خواص مکانیکی و سدگری اکسیژن، اغلب در قالب ساختارهای چندلایه با سایر مواد ترکیب می‌شوند. ازآنجاکه این پلیمرها سد ضعیفی دربرابر بخار آب محسوب می‌شوند، معمولاً با مواد دارای مقاومت رطوبتی بیشتر همراه می‌شوند. این ترکیب‌ها امکان طراحی بسته‌بندی‌های متناسب با کاربردهای خاص را فراهم کرده که میان حفاظت، دوام و الزامات فرایندی توازن ایجاد می‌کنند. بااین‌حال، چنین ساختارهایی می‌توانند موجب ناسازگاری در فرایند بازیافت شوند. ازاین‌رو، توسعه فناوری‌های پایدار و کارآمد برای بازیافت آن‌ها ضرورت یافته است [۸].

برای پلی‌آمیدها سه رویکرد اصلی بازیافت شامل بازیافت مکانیکی، شیمیایی و بازیافت با بازیابی انرژی وجود دارد [۹-۱۱]. تمرکز این مطالعه بر بازیافت مکانیکی است که به‌سبب مزایای زیست‌محیطی شاخص، اهمیت ویژه‌ای دارد.

بازیافت مکانیکی به‌عنوان گزینه‌ای مطلوب از نظر زیست‌محیطی شناخته می‌شود. زیرا این نوع بازیافت با حفظ ساختار پلیمری و استفاده از مراحل فیزیکی نظیر خردکردن، ذوب و اکسترودکردن به انرژی کمتری نیاز دارد و در آن از فرایندهای شیمیایی یا احتراق اجتناب شده که به انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. این روش با امکان بازاستفاده از مواد در تولید محصولات جدید، تقاضا برای پلیمر بکر را کاهش می‌دهد و درنتیجه حجم ضایعات به‌حداقل می‌رسد. افزون‌براین، انتشار گازهایی مانند CO_2، که معمولاً در تولید مونومرهای فسیلی و فرایند سوزاندن ایجاد می‌شوند، به‌طور شایان توجهی کاهش می‌یابد [۸]. در ادامه با تمرکز بر یافته‌های مطالعات پیشین، فرصت‌ها و چالش‌های بازیافت

مکانیکی پلی‌آمیدها بررسی شده و دیدگاه روشنی از وضعیت فعلی این حوزه ارائه داده می‌شود.

پلی‌آمیدها

تاریخچه

پلی‌هگزامتیلن آدیپ‌آمید یا پلی‌آمید ۶۶ (PA66) نخستین گرمانرم مهندسی تجاری بود که در فاصله سال‌های ۱۹۲۸ تا ۱۹۳۷ والاس هیوم کاروترز و همکاران در شرکت آمریکایی دوپونت طی پژوهش‌های گسترده درباره پلیمرشدن تراکمی آن را ابداع کردند و نایلون ۶۶ نام گرفت. انگیزه بخشی از این تلاش، انحصار ژاپن بر ابریشم در دهه ۱۹۳۰ و جست‌وجوی جایگزین‌های مناسب بود. فرایند تجاری‌سازی آن از سال ۱۹۳۸ با تولید تک‌رشته‌های مسواک آغاز شد و در سال ۱۹۳۹ به تولید الیاف رسید. نایلون به‌عنوان نخستین پلیمر مصنوعی وارد بازار شد و به‌سرعت در تولید پوشاک و تجهیزات جنگی مانند چتر نجات و چادرها در جنگ جهانی دوم جایگاه یافت. از دهه ۱۹۵۰ نیز ورود آن به بازار بسته‌بندی آغاز شد [۶،۷].

نخستین‌بار یوهان فون براون بین سال‌های ۱۹۰۵ تا ۱۹۱۰ در دانشگاه گوتینگن، پلی‌کاپرولاکتام یا پلی‌آمید ۶ (PA6) را تولید کردند. چند سال بعد، پاول شلاک با ثبت چند ثبت اختراع درباره پلیمرشدن کاتالیزی کاپرولاکتام به پلی‌آمید ۶، به‌عنوان مخترع این پلیمر در مقیاس تجاری شناخته شد [۶،۷]. ماهیت پیشگامانه این ابداعات، علت اصلی تسلط دو نوع PA6 و PA66 بر بازار است. بااین‌حال، پس از آن پلی‌آمیدهای متعدد دیگری با استفاده از ترکیبات اولیه گوناگون توسعه یافته و به بازار عرضه شده‌اند.

ویژگی‌های کلی، طبقه‌بندی و کاربردهای تجاری پلی‌آمیدها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ریشه توسعه تجاری پلی‌آمید به پژوهش پیشگامانه کاروترز در زمینه پلیمرشدن تراکمی بازمی‌گردد که به تولید پلی‌آمید ۶۶ منجر شد. در این فرایند، مونومرها ازطریق واکنش تراکمی با حذف یک مولکول کوچک به‌هم متصل می‌شوند. هرچند پلی‌آمیدها به‌طور طبیعی نیز وجود دارند، مانند واکنش خودتراکمی اسیدهای آمینه، اما عمدتاً به‌طور سنتزی و از دو مسیر اصلی تولید می‌شوند:

۱- واکنش تراکمی دی‌آمین با دی‌کربوکسیلیک اسید، نمونه پلی‌آمید ۶۶؛

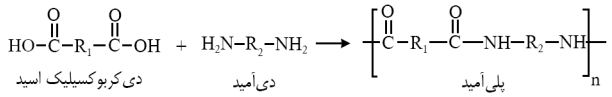
۲- پلیمرشدن حلقه‌گشای لاکتام، نمونه پلی‌آمید ۶.

در نام‌گذاری پلی‌آمیدها، نوع PA XY نشانگر استفاده از دو مونومر است که X تعداد اتم‌های کربن مونومر دی‌آمین و Y تعداد اتم‌های کربن مونومر دی‌اسید را مشخص می‌کند (مانند پلی‌آمید ۶۶). درمقابل، پلی‌آمیدهای حاصل از حلقه‌گشایی یک مونومر دوکاره، مانند کاپرولاکتام با PA Z نمایش داده می‌شوند که Z تعداد کربن مونومر را نشان می‌دهد مانند پلی‌آمید ۶ [۷،۱۲]. جدول ۱ ویژگی‌های اصلی پلی‌آمیدهای آلیفاتیک و شکل ۲ ساختار مولکولی آن‌ها را نشان می‌دهند.

پلی‌آمیدها ازنظر مکانیکی، استحکام کششی زیاد، مقاومت سایشی و استحکام ضربه‌ای ممتاز و دوام دربرابر خراش دارند. آن‌ها ازنظر شیمیایی دربرابر حلال‌ها، اسیدها، بازها، سوخت‌ها، گریس و روغن مقاومت زیاد داشته و سدگری اکسیژن بسیار خوبی دارند [۱۲]. حدود ۹۵ درصد مصرف صنعتی پلی‌آمیدها به پلی‌آمید ۶ و پلی‌آمید ۶۶ اختصاص دارد. سایر انواع مانند پلی‌آمید ۶۹، ۶۱۰، ۶۱۲، ۱۱ و ۱۲ به‌عنوان محصولات ویژه با قیمت بیشتر شناخته می‌شوند [۱۴].

افزون‌بر داده‌های ارائه‌شده در جدول ۱، که برای کاربردهایی چون خودروسازی و ساخت‌وساز اهمیت دارد، عواملی مانند درجه بلورینگی و نفوذپذیری اکسیژن و بخار آب نیز در کاربری‌های خاص، به‌ویژه در فیلم‌های بسته‌بندی و چندلایه حائز اهمیت‌اند. این ویژگی‌ها مبنای ارزشمندی برای ارزیابی قابلیت بالقوه پلی‌آمیدها، به‌ویژه در بسته‌بندی مواد غذایی و محصولات نیازمند سدگری زیاد، فراهم می‌آورند. بلورینگی نقش کلیدی در تعیین استحکام مکانیکی، پایداری گرمایی، مقاومت شیمیایی، شفافیت، چگالی و دوام ایفا می‌کند، به‌گونه‌ای که بلورینگی پلی‌آمید ۶۶ حدود ۷۰ درصد و پلی‌آمید ۶ حدود ۶۷ درصد گزارش شده است [۱۶].

در صنعت خودرو به‌سبب نیاز به مواد سبک و کارا از پلی‌آمیدها در قطعاتی چون رادیاتور، سامانه‌های خنک‌کاری، پوشش موتور، خطوط سوخت، پمپ سوخت، چراغ‌ها و سامانه‌های برقی استفاده می‌شود. در صنایع برق و الکترونیک، مقاومت گرمایی زیاد، عایق‌بودن الکتریکی، مقاومت سطحی زیاد و اشتعال‌پذیری کم آن‌ها ارزش ویژه‌ای دارد. همچنین، الیاف پلی‌آمید از نخستین کاربردهای تجاری این پلیمر بوده و به‌دلیل قیمت مناسب، دوام، استحکام و انعطاف‌پذیری، جایگاه گسترده‌ای در پوشاک و منسوجات یافته‌اند [۷].



شکل ۲- تشکیل و نام‌گذاری یک مولکول پلی‌آمید معمولی [۱۵].

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های پلی‌آمیدهای پرمصرف [۱۳].

نام	مونومرهای سازنده	دمای ذوب (°C)	جذب رطوبت در ۲۴ h (٪wt)	چگالی (g/cm^3)	استحکام تسلیم کششی (MPa)	ازدیاد طول تا پارگی (٪)	خواص	کاربردهای اصلی
نایلون ۶۶ (PA66)	هگزان-۱،۶-دی‌آمین و آدیپیک‌اسید	۲۵۵	۱/۲	۱/۱۴	۸۳	۶۰-۹۰	دمای ذوب و انتقال شیشه‌ای نسبتاً زیاد، استحکام و سختی مکانیکی زیاد (چقرمگی) و مقاومت شیمیایی	فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی، عایق‌های الکتریکی، قطعات ماشین‌آلات، صنعت خودرو (قطعات موتور، صافی‌های سوخت، کیسه‌های هوا و غیره)
نایلون ۶ (PA6)	ε-کاپرولاکتام	۲۱۵	۱/۶	۱/۱۳	۸۱	۵۰-۱۵۰	چقرمگی زیاد، ضریب اصطکاک کم، مقاومت شیمیایی و سایشی و تاب‌آوری بار زیاد در دمای زیاد	فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی، انواع مختلف ظروف، کلیدهای برق، ماسوره‌ها، رابط‌ها، قطعات خودرو و غیره
نایلون ۱۱ (PA11)	۱۱-آمینواندکانوئیک اسید	۱۹۴	۰/۳	۱/۰۳	۵۵	۲۰۰	وزن مخصوص کم، استحکام ضربه‌ای زیاد، جذب رطوبت کم، مقاومت دربرابر واکنشگرهای آب‌کافتی و تابش فرابنفش، پایداری ابعادی و گران‌تر از سایر پلی‌آمیدها	استفاده در چند بخش صنعتی و خودروسازی، لوله‌های انعطاف‌پذیر برای حمل‌ونقل نفت فراساحلی (افزایش مقاومت به خوردگی دریایی)
نایلون ۱۲ (PA12)	دودکانولاکتام و ۱۲-آمینودودکانوئیک اسید	۱۷۹	۰/۲۵	۱/۰۲	۵۵	۲۰۰	جذب رطوبت و چگالی کم، مقاومت شیمیایی، مقاومت بسیار دربرابر ترک‌برداری تنشی (انعطاف‌پذیری) و استحکام ضربه‌ای در حالت خشک و دمای کم	کاربردهای متعدد در صنعت خودرو و برق
نایلون ۶۹ (PA69)	هگزامتیلن دی‌آمین و آزالیک اسید	۲۰۵	۰/۵	۱/۰۸	۵۵	۱۲۵	دمای ذوب و جذب رطوبت کم و پایداری ابعادی خوب	اتصالات برق، بنرها، کیف‌های چمدانی و مبلمان

در حوزه بسته‌بندی نوین، فیلم‌های پلی‌آمیدی به‌شکل تک‌محوری یا دوجهتی تولید می‌شوند و به‌دلیل استحکام، مقاومت گرمایی و سدگری گازی در بسته‌بندی انعطاف‌پذیر چندلایه کاربرد دارند. بااین‌حال، ضعف در سدگری بخار آب و کاهش عملکرد مکانیکی و سدگری در شرایط مرطوب از محدودیت‌های آن‌هاست [۶]. برای رفع این مشکل، فیلم‌های پلی‌آمیدی اغلب با پلی‌اولفین‌ها، اتیلن وینیل استات (EVA) یا یونومرها به‌شکل چندلایه هم‌اکسترود یا چندلایه می‌شوند که ضمن حفظ خواص اصلی، مقاومت دربرابر رطوبت را بهبود می‌دهد [۱۷]. این ساختارها در بسته‌بندی پروتئین و پنیر بسیار رایج‌اند که در آن‌ها حفظ تازگی و افزایش ماندگاری ضروری است. درمجموع پلی‌آمیدها، به‌ویژه در حوزه بسته‌بندی با ایجاد حفاظت مکانیکی و شیمیایی، تضمین ایمنی و افزایش عمر مفید، نقشی اساسی در صنایع غذایی و غیرفراورشی ایفا می‌کنند.

بازیافت پلی‌آمیدها

پلی‌آمیدها را می‌توان از مسیرهای گوناگون بازیافت کرد که مهم‌ترین آن‌ها بازیافت مکانیکی و شیمیایی است [۱۱-۹]. جدول ۲ مقایسه کلی این دو روش را ارائه می دهد. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر بررسی مطالعات مرتبط با بازیافت مکانیکی بوده و ضمن تبیین فرایندها به دستاوردهای شاخص این حوزه پرداخته شده است. بااین‌حال، سایر روش‌های بازیافت نیز به‌طور کوتاه مرور شده تا ویژگی‌های اصلی و تفاوت آن‌ها با مسیر مکانیکی روشن شود.

بازیافت شیمیایی پلی‌آمیدها

بازیافت شیمیایی، فرایندهایی را شامل می‌شود که زنجیرهای پلیمری را به مولکول‌های کوچک‌تر، مانند مونومر، اولیگومر یا

جدول ۲- مقایسه بازیافت شیمیایی و مکانیکی پلی‌آمیدها.

معیار مقایسه	بازیافت شیمیایی	بازیافت فیزیکی
تعریف و ماهیت فرایند	فرایند شیمیایی: شکست زنجیر پلیمری به مونومرها و اولیگومرها ازطریق واکنش‌های واپلیمرشدن (آب‌کافت، گلیکول‌کافت و آمونیاکافت)	فرایند فیزیکی: خردکردن، ذوب و اکسترودکردن بدون تغییر ساختار شیمیایی پلیمر
محصول نهایی و کیفیت	مونومرهای خالص باکیفیت معادل مواد بکر و قابل‌استفاده در سنتز پلیمر جدید	پلیمر بازیافتی با خواص کاهش‌یافته (استحکام کششی کمتر، تخریب تدریجی در هر چرخه)
مصرف انرژی و آثار زیست‌محیطی	انرژی‌بر: نیاز به دما و فشار زیاد (°C ۸۰ تا °C ۳۰۰)، انتشار گازهای گلخانه‌ای بیشتر و تولید پساب‌های شیمیایی	کمترین انرژی و کمترین انتشار گازهای گلخانه‌ای و عدم نیاز به تبدیل شیمیایی
هزینه و پیچیدگی	پیچیده و گران: کاتالیزگرهای گران‌قیمت، واکنشگاه‌های تخصصی، مراحل جداسازی و زمان طولانی	ساده و ارزان: تجهیزات استاندارد، بدون نیاز به کاتالیزگر و فرایند کوتاه
بازده و امکان چرخه‌های مکرر	نامحدود: مونومرها قابل‌استفاده مکرر و بازده زیاد (۵۹/۲ درصد تا ۹۹ درصد بسته به روش)	محدود: ۳ تا ۷ چرخه بازیافت پیش از تخریب درخور توجه و بازده متغیر بسته به کیفیت ورودی
محدودیت‌های عملیاتی	آلودگی و ناخالصی بیشتر، عدم توجیه اقتصادی در مقیاس صنعتی	حساس به آلودگی و اختلاط پلیمرها و نیاز به تفکیک دقیق
مرجع	۱۸	۱۳

ترکیبات با وزن مولکولی کم و قابلیت بازاستفاده در تولید پلیمر نو، سوخت یا سایر مواد شیمیایی، تجزیه می‌کند. این فرایندها عموماً بر روش‌های واپلیمرشدن مانند گلیکول‌کافت، متانول‌کافت، آب‌کافت و آمین‌کافت متکی هستند. روش‌های گرمایی مانند تفکافت و گازشدن نیز با شکستن پیوندهای موجود در زنجیر پلیمری نقش دارند [۱۸]. در سال‌های اخیر، فناوری آب‌گرمایی با بهره‌گیری از شرایط آب زیربحرانی یا ابربحرانی، به‌عنوان روش کارآمدی برای تجزیه پلی‌آمیدها و تولید مونومرهای ارزشمند مطرح شده است. این مسیرها نه‌تنها امکان بازیافت، بلکه به‌یافت (upcycling) مواد پلاستیکی بازیافت‌ناپذیر مکانیکی را فراهم می‌سازند [۸].

آب‌کافت شامل آب‌کافت اسیدی و قلیایی است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، واحدهای مونومری سازنده مانند ε-کاپرولاکتام (CPL)، آدیپیک اسید (AA) و هگزامتیلن‌دی‌آمین (HMD) محصولات اصلی هستند. آمین‌کافت به فرایندی اطلاق می‌شود که طی آن پلی‌آمید در اثر عوامل آمین‌سازی چون آمونیاک (NH_3) به ترکیبات آمینی تبدیل می‌شود. افزون‌براین، ساختار نیمه‌بلوری PA همراه با پیوندهای هیدروژنی بین‌مولکولی قوی موجب کاهش دسترسی به پیوندهای آمیدی ثانویه می‌شود و حمله هسته‌دوستی را محدود می‌کند. درنتیجه واپلیمرشدن ازنظر ترمودینامیکی تنها در دماهای زیاد مطلوب می‌شود [۱۹]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها به سوی بررسی حلال‌های جدید ازجمله مایعات یونی و حلال‌های آلی، سوق یافته‌اند. نقش حلال، برهم‌زدن ساختار پلیمر، کاهش دمای سقف واپلیمرشدن و افزایش بازده است. گلیکول‌کافت یکی از کارآمدترین روش‌های حلالی است که موجب تولید دی‌آمین‌ها، مشتقات اتیلن گلیکول (EG) و اولیگومرها می‌شود. افزون‌براین، هیدروژن‌کافت نیز برای واپلیمرشدن PA ازطریق شکست پیوند C–N به‌کار می‌رود و به تشکیل الکل‌ها و آمین‌ها منجر می‌شود [۲۰]. در بخش آمونیاکافت، Coeck و همکاران [۲۱] نوعی سامانه کاتالیزی ناهمگن برپایه Nb_2O_5 را برای آمونیاکافت پلی‌آمیدهای زنجیربلند (LCPA) معرفی کردند. این فرایند در دمای نسبتاً ملایم °C ۲۰۰ با استفاده از سیکلوپنتیل متیل‌اتر (CPME) به‌عنوان حلال سبز و مقادیر اندک NH_3 و H_2 انجام شد. ازآنجاکه آمونیاکافت واکنش محدود به تعادل است، این فرایند با یک مرحله هیدروژن‌دارکردن تکمیلی همراه شده تا واپلیمرشدن کامل شود. این مرحله در مجاورت کاتالیزگر $RuWOx/MgAl_2O_4$ آسان‌تر شد. پلی‌آمیدهای تجاری LCPA به‌طور کامل به مونومرهای ω،α-دی‌آمین و اولیگومرها واپلیمر شدند و ۶۲ درصد از آمین‌های اولیه و ۳۶ درصد از آمین‌های ثانویه تولید شد (جدول ۳).

Hommez و همکاران [۲۲]، گلیکول‌کافت PA6 با فسفریک اسید را در °C ۲۵۰ بررسی کردند و مخلوطی از ترکیبات با وزن‌مولکولی کم شامل مشتقات EG از CPL و اولیگومرهای خطی را به‌دست آوردند. ترکیبات حاصل دارای گروه‌های انتهایی کربوکسیلیک اسید آزاد یا استری‌شدن با EG بودند (جدول ۳).

Datta و همکاران [۲۳]، گلیکول‌کافت و آمین‌کافت- گلیکول‌کافت PA66 را با EG اضافی و مخلوط EG و TETA بررسی کردند. مخلوط حاصل شامل ترکیبات با وزن مولکولی کم و

جدول ۳- نمونه مطالعات درباره واپلیمرشدن PA در محیط‌های واکنشی مختلف.

پلی‌آمید	محیط واکنش	شرایط واکنش	محصولات اصلی	مرجع
LCPA	NH_3	$RuWOx/MgAl_2O_4$ و CPME، H_2 ۱ bar، NH_3 ۶ bar، ۵ h، ۲۰۰ °C	ω,α-دی‌آمین	۲۱
PA6	EG	H_3PO_4 مولی و ۱۰ درصد EG، ۳ h، ۲۵۰ °C	مشتقات EG از CPL و اولیگومرها	۲۲
PA66	EG و TETA	$(NH_4)_2HPO_4$ و EG+TETA، ۱/۵ h، ۱۹۰ °C	استرها و آمین‌های اولیه	۲۳

دارای گروه‌های هیدروکسیل و آمین بود که غلظت آن‌ها تحت تأثیر مقادیر EG و TETA قرار داشت (جدول ۳). عدد هیدروکسیل در طول گلیکول‌کافت به‌طور درخور توجهی افزایش و عدد آمین کاهش یافت. وزن مولکولی کم (Mn=۲۵۰-۹۰ g/mol) نشانگر بازده مطلوب بود. این واسطه‌های گلیکول‌کافتی برای سنتز پلی(استر-یورتان)های جدید و جایگزینی حدود ۱۰ درصد تا ۱۵ درصد وزنی پلی‌اُل‌های تجاری قابل‌استفاده بودند. حلال واکنش‌پذیر افزون بر برهم‌کنش با زنجیرهای PA، تخریب ساختار بلوری و آسان‌سازی حل‌شدن آن می‌تواند در واکنش‌هایی مانند استری‌شدن نیز نقش کاتالیزی یا واکنشی داشته باشد. آب‌کافت آمونیاک روش کارآمدی برای ارتقای پسماندهای PA به ترکیبات آمینی است، اما معمولاً به دما و فشار زیاد و تجهیزات پیچیده نیاز دارد. گلیکول‌کافت رایج‌ترین نوع روش حلال‌کافت است و محدودیت‌های تبدیل تعادلی و دشواری خالص‌سازی محصول مونومری از چالش‌های اصلی آن هستند [۲۰].

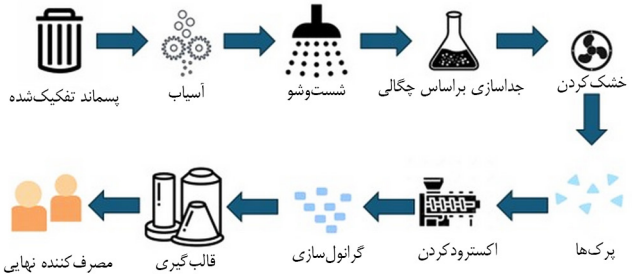
به‌طورکلی، بازیافت شیمیایی پلی‌آمیدها مسیر واپلیمرشدن‌محور است که با تکیه بر واکنش‌های آب‌کافت، آمونیاکافت، گلیکول‌کافت و سایر فرایندهای حلالی یا کاتالیزی، امکان شکستن پیوندهای آمیدی مقاوم و تولید مولکول‌های ارزشمند مانند ε-کاپرولاکتام، اولیگومرها، دی‌آمین‌ها و مشتقات واکنشی را فراهم می‌کند. با وجود مانع‌زایی ساختار نیمه‌بلوری PA و پایداری ترمودینامیکی پیوندهای آمیدی، به‌کارگیری حلال‌های واکنش‌پذیر، شرایط آب‌گرمایی، کاتالیزگرهای اسید لوویس و سامانه‌های ناهمگن برپایه Nb_2O_5 یا $RuWOx/MgAl_2O_4$ را نشان می‌دهد، بازده فرایند و کیفیت محصولات را می‌توان افزایش داد و حتی مسیرهای ارتقای ارزش را ایجاد کرد. انتخاب کاتالیزگر مناسب و کنترل دما-فشار می‌تواند تا حد زیادی قابلیت تبدیل پلی‌آمیدهای خطی و نیمه‌بلوری را به مونومرهای بازاستفاده‌پذیر ایجاد کند. هرچند محدودیت‌های تبدیل تعادلی، دشواری تفکیک محصولات و هزینه‌های انرژی همچنان چالش‌های اصلی باقی مانده‌اند. درمجموع، پیشرفت‌های اخیر عملکردی و حلال‌های سبز چشم‌انداز نوینی را برای کاهش دمای لازم، افزایش گزینش‌پذیری و امکان بهره‌برداری صنعتی از مسیرهای بازیافت شیمیایی ایجاد کرده‌اند.

بازیافت مکانیکی

بازیافت مکانیکی اصلی‌ترین رویکرد در مدیریت پسماندهای پلاستیکی محسوب می‌شود. این نوع از بازیافت شامل فرایندهایی است که پلاستیک‌های پیش‌مصرف یا پس‌مصرف را ازطریق روش‌های فیزیکی بازیابی کرده و به محصولات پلیمری جدید تبدیل می‌کند. این روش می‌تواند جایگزین کل یا بخشی از پلیمر بکر در محصول نهایی شود [۲۴]. بااین‌حال، تکرار فرایند ذوب‌ریسی و قرارگیری پلیمر در معرض گرما، تنش برشی و آلودگی‌ها، موجب کاهش وزن مولکولی و خواص مکانیکی می‌شود. این پدیده که با عنوان فرویافت (downcycling) شناخته می‌شود، قابلیت استفاده در کاربردهای مهندسی حساس را محدود می‌سازد.

فرایند مکانیکی معمولاً با جمع‌آوری، جداسازی و شست‌وشوی ضایعات پلی‌آمید آغاز می‌شود. سپس مرحله خردایش با کمک خردکن‌های چندمحوری و تیغه‌ای انجام می‌گیرد که قطعات به‌شکل تراشه یا پودر درمی‌آیند. پس از آن، جداسازی براساس چگالی، غربال‌گری، خشک‌کردن و نهایتاً اکسترودکردن (فرایند ذوب و شکل‌دهی) انجام می‌شود. در این مرحله، افزودن مواد بهبوددهنده یا سازگارکننده به‌طور اختیاری امکان‌پذیر است [۲۵]. توالی این مراحل بسته به منبع و ترکیب پسماند می‌تواند تغییر کند (شکل ۳).

باوجود هزینه‌بری بخش‌های جداسازی و شست‌وشو، این روش به‌دلیل سرعت، مقیاس‌پذیری زیاد و عدم تولید مستقیم CO_2 یا گازهای آلاینده، گزینه کارآمدی برای بازیافت پلی‌آمیدها به‌شمار می‌رود. بااین‌حال، باید به خطر تخریب ساختار پلی‌آمید در اثر ذوب‌ریسی مکرر و وجود آب توجه ویژه داشت که تخریب زنجیر را شتاب می‌دهد. باوجود این چالش‌ها، بازیافت مکانیکی همچنان روشی اقتصادی در مقیاس صنعتی و بدون استفاده از حلال است که با انتخاب صحیح منبع پسماند، امکان بازتولید محصولات پلی‌آمیدی باکیفیت را فراهم می‌آورد [۲۶].



شکل ۳- مراحل بازیافت مکانیکی.

چالش‌های بازیافت مکانیکی

فرایند بازیافت مکانیکی پلیمرهای تک‌لایه و مخلوط در مواجهه با شرایطی چون گرما، اکسایش، تابش نور و تنش برشی، مستعد کاهش کیفیت و عملکرد ماده است. از میان اشکال گوناگون تخریب، تخریب گرمایی-مکانیکی در اثر ترکیب آثار گرما و برش حین بازفراوری، بیشترین بروز را دارد. نوع دیگر تخریب در طول چرخه عمر محصول با قرارگیری طولانی‌مدت در معرض گرما، اکسیژن، نور، رطوبت، تابش و تنش مکانیکی شکل می‌گیرد که به کاهش تدریجی خواص منجر می‌شود [۲۴،۲۷].

در پسماندهای پلیمری مخلوط، تفاوت دماهای ذوب و فراوری اجزا چالش اساسی به‌شمار می‌رود. انتخاب دمای فراوری برمبنای پلیمر با بیشترین دمای ذوب، موجب گرمادهی بیش از حد و تخریب پلیمرهای با دمای ذوب کمتر می‌شود و کیفیت محصول نهایی را کاهش می‌دهد [۲۷]. از رویکردهای غلبه بر این مشکل، استفاده از پلیمر بکر، پرکننده‌ها، الیاف تقویتی، سازگارکننده‌ها و افزودنی‌هایی نظیر پراکسیدها، عوامل جفت‌کننده، پلیمرهای واکنشی، پایدارکننده‌ها و ضداکسنده‌هاست که ضمن بهبود خواص، قابلیت بازاستفاده مواد را در صنایع پلاستیک افزایش می‌دهد [۲۴].

رطوبت، سرعت واپلیمرشدن و تخریب گرمایی-مکانیکی را تشدید می‌کند. ازاین‌رو، خشک‌کردن کامل پیش از فراوری مذاب به‌عنوان اقدامی ضروری، اما پرهزینه مطرح است. جالب توجه آنکه همین سازوکار واپلیمرشدن ناشی از رطوبت، اساس فناوری نوظهور بازیافت شیمیایی آب‌گرمایی در پلی‌آمیدها را تشکیل می‌دهد. به‌عنوان جایگزین خشک‌کردن، می‌توان از ضداکسنده‌ها و پایدارکننده‌ها برای کاهش آثار مخرب رطوبت طی فرایند ذوب بهره برد [۲۸].

نگاهی به پژوهش‌های انجام‌شده

بررسی‌های انجام‌شده درباره بازیافت مکانیکی پلی‌آمیدها و مواد حاوی آن، مجموعه متنوعی از روش‌ها، چالش‌ها و نتایج را در حوزه‌های مختلف نشان می‌دهد. در راستای ترسیم تصویری جامع از وضعیت علمی این حوزه، در جدول ۴ منتخبی از مطالعات شاخص گردآوری شده است تا ضمن معرفی نوع پلیمر، منبع خوراک، فرایند به‌کاررفته و یافته‌های کلیدی، امکان مقایسه مستقیم رویکردها و نتایج فراهم شود. مطالعات Su و همکاران [۲۹]، اثر چرخه‌های متعدد تزریق و ذوب مجدد را بر PA6 بررسی کردند. نتایج، کاهش وزن مولکولی، تغییر رفتار تبلور و کاهش تدریجی چقرمگی ضربه‌ای را نشان داد، هرچند افزایش استحکام کششی و خمشی نیز دیده شد. کاهش اندازه گویچه‌ها و شکل‌گیری بلورهای کوچک‌تر به‌دلیل ذرات تجزیه‌نشده نیز گزارش شد.

Colucci و همکاران [۳۰] در زمینه کامپوزیت‌های تقویت‌شده، بازیافت PA66 پرشده با الیاف کربن و Bernasconi و همکاران [۳۱]، کامپوزیت‌های الیاف شیشه را بررسی کردند. کاهش طول الیاف و مقاومت خستگی در اثر بازفراوری مشاهده شده، اما ویژگی‌های لازم برای کاربردهای خودرویی همچنان حفظ شد.

Pan و همکاران [۳۲] نیز کامپوزیت‌های قالب‌گیری فشاری با قابلیت جذب صوت زیاد از فرش‌های PA6/PA66 ساختند. Albitres و همکاران [۳۳]، ضایعات نساجی حاوی PA6 و Spandex را با PET بازیافت کردند و به بلوک‌هایی با بهبود خواص گرمایی و

جدول ۴- برخی از مطالعات شاخص در حوزه بازیافت مکانیکی پلی‌آمیدها.

پلی‌آمید	نوع خوراک	فرایند-روش	مهم‌ترین یافته‌ها	مرجع
PA66 + GF	بکر- بازیافتی	دانه‌بندی + تزریق	کوتاه‌شدن الیاف و کاهش استحکام، سختی و استحکام خستگی متناسب با استحکام کششی و اثر منفی رطوبت بر سختی و خستگی	۳۱
PA6/PA66 + SBR + $CaCO_3$	فرش دورریخته	قالب‌گیری فشاری	بهبود مدول و استحکام خمشی و ضربه‌ای و کارایی جذب صوت زیاد	۳۲
PA6 + Spandex + PET	ضایعات نساجی	آمیزه‌کاری با ذوب	برهم‌کنش پلیمرها، تغییر رفتار تبلور و گرمایی و قابلیت بازاستفاده در نساجی	۳۳
PA12	پودر SLS بازیافتی	آمیزه برای FDM	تفاوت ناچیز بکر و بازیافتی، ایجاد خواص هدفمند به‌وسیله افزودنی‌ها و کاربرد در پروتز چاپ سه‌بعدی	۳۴

جدول ۵- داده‌های فهرست چرخه عمر (LCI) برای بازیافت پلی‌آمید ۶ به روش حل‌کردن گزینشی [۳۵].

دسته	مؤلفه	مقدار	توضیح
ورودی مواد	پسماند PA6 (kg)	۱/۳۴۴	خوراک ورودی مخلوط پلی‌آمیدی
ورودی مواد	فرمیک اسید ۸۵ wt٪ (kg)	۰/۰۵۰	حلال اصلی فرایند
ورودی مواد	آب یون‌زدوده (kg)	۰/۰۰۹	برای رقیق‌سازی-فراوری
ورودی انرژی	برق (kWh)	۰/۹۱	تمام مراحل فرایند (خردایش تا گرانول‌سازی)
ورودی انرژی	بخار کم‌فشار (kg)	۱۷/۸۹	برای حل‌کردن و بازیابی
ورودی آب	آب خنک‌کن (kg)	۳۴۱	چرخه خنک‌کاری (مصرف غیرتبخیری)
خروجی محصول	PA6 بازیافتی (kg)	۱/۰۰	محصول نهایی
خروجی جانبی	جزء غیرنایلونی (kg)	۰/۳۲۲	ارسال به سوزاندن یا جداسازی
خروجی پساب	پساب فرایند (kg)	۰/۰۸۲	ارسال به تصفیه‌خانه
خروجی آب	آب خنک‌کن (kg)	۳۴۱	بازگشت به سامانه

مکانیکی دست یافتند.

Mägi و همکاران [۳۴] در ساخت افزایشی با بهره‌گیری از پودر باقی‌مانده PA12 حاصل از فرایند چاپ سه‌بعدی، آمیخته‌هایی با افزودنی‌هایی چون پلی‌یورتان گرمانرم (TPU) و گرافیت تولید کردند. نتایج نشان داد، تفاوت خواص مکانیکی نمونه‌های PA12 بکر و بازیافتی ناچیز است و عملکرد ماده بازیافتی در سطح رقابت‌پذیر با ماده بکر باقی می‌ماند. درمجموع، بازیافت مکانیکی پلی‌آمید روش مؤثر و قابل‌اتکایی برای طیف گسترده‌ای از کاربردها به‌شمار می‌آید، اما موفقیت آن منوط به جداسازی دقیق آن از سایر اجزای مخلوط، مدیریت کارآمد رطوبت و محدودسازی تعداد چرخه‌های ذوب و فراوری است. جدول ۵ داده‌های کمّی موجود برای بخش فهرست چرخه عمر (life cycle inventory, LCI) بازیافت پلی‌آمید ۶ با روش حل‌کردن گزینشی برپایه فرمیک اسید را نشان می‌دهد. این داده‌ها براساس واحد اعلام‌شده، یعنی kg ۱ از PA6 بازیافتی، استخراج شده و شامل ورودی‌های مواد، انرژی و آب و همچنین خروجی‌های محصول، جزء غیرنایلونی و پساب است. سهم زیاد مصرف بخار کم‌فشار و آب خنک‌کن نشان می‌دهد، بار انرژی و آب این مسیر بازیافت عمدتاً به مرحله حل‌کردن و بازیابی پلیمر وابسته است [۳۵]. بااین‌حال، کمبود داده‌های جامع در زمینه ارزیابی چرخه عمر (life cycle assessment, LCA) و تحلیل فنی اقتصادی (techno economic analysis, TEA) همچنان مشهود است. ازاین‌رو، پرداختن به این خلأ باید در اولویت پژوهش‌های آتی قرار گیرد تا امکان ارزیابی جامع آثار زیست‌محیطی و اقتصادی این فرایند فراهم شود.

نتیجه‌گیری

پلی‌آمیدها به‌واسطه تنوع عملکرد، جایگاه راهبردی در حوزه‌هایی چون مواد مهندسی، بسته‌بندی مواد غذایی و صنایع نساجی یافته‌اند. در پرتو گسترش رویکرد اقتصاد چرخشی که محور آن کاهش پسماند، بهینه‌سازی مصرف منابع و افزایش چرخه عمر محصولات است، بازیافت مکانیکی و شیمیایی پلی‌آمیدها به‌عنوان یکی از ارکان کلیدی مدیریت پایدار مواد مطرح شده است. باوجوداین، تداوم کیفیت در چرخه‌های متعدد بازیافت، جداسازی دقیق از سایر اجزای مخلوط و کنترل دقیق رطوبت و فرایندهای تخریب گرمایی، چالش‌های جدی و تعیین‌کننده در این زمینه به‌شمار می‌آیند. مرور مطالعات موجود نشان می‌دهد، اگرچه بهبود فناوری‌ها دستاوردهای درخور توجهی داشته است، اما شکاف‌های فنی و اجرایی همچنان پابرجاست. در افق پژوهش‌های آینده، توسعه فناوری‌های نوین با بازده بیشتر، ارتقای سازگاری و خواص مواد بازیافتی و یافتن مسیرهای کاربردی نوآورانه می‌تواند قابلیت بالقوه واقعی بازیافت پلی‌آمید را بالفعل سازد. تحقق این اهداف، نه‌تنها موجب کاهش وابستگی به منابع اولیه می‌شود، بلکه زمینه‌ساز ایجاد چرخه‌های مواد پایدار، کاهش بار زیست‌محیطی و تحقق عملی اصول اقتصاد چرخشی در مقیاس صنعتی خواهد بود.

مراجع

1. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, OECD, Paris, 2022. doi: 10.1787/aa1edf33-en.
2. Marangoni Júnior L., Augusto P.E.D., Vieira R.P. et al., Food-Package-Processing Relationships in Emerging Technologies: Ultrasound Effects on Polyamide Multilayer Packaging in Contact with Different Food Simulants, *Food Res. Inter.*, **163**, 112217, 2023.
3. Turriziani B.B., Perez M.Â.F., Kiyataka P.H.M., Vieira R.P., Marangoni Júnior L., and Alves R.M.V., Effect of Maleic Anhydride-Based Compatibilizer Incorporation on the Properties of Multilayer Packaging Films for Meat Products, *J. Polym. Res.*, **30(**6), 194, 2023.
4. Geyer R., Jambeck J.R., and Law K.L., Production, Use, and Fate of all Plastics ever Made, *Sci. Adv.*, **3**(7), e1700782, 2017.
5. Ncube L.K., Ude A.U., Ogunmuyiwa E.N., Zulkifli R., and Beas I.N., An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries, *Recycling*, **6**(1), 12, 2021.
6. Sarantópoulos C.I.G.L. and Teixeira F.G., *CETEA/ITALEmbalagens Plásticas Flexíveis: Principais Polímeros e Avaliação de Propriedades*, 2nd, CETEA/ITALEmbalagens, 2017.
7. Deopura B.L. and Padaki N.V., Synthetic Textile Fibres: Polyamide, Polyester and Aramid Fibres, In: *Textiles and Fashion*, Woodhead, 97-114, 2015.
8. Minor A.J., Goldhahn R., Rihko-Struckmann L., and Sundmacher K., Chemical Recycling Processes of Nylon 6 to Caprolactam: Review and Techno-Economic Assessment, *Chem. Eng. J.*, **474**, 145333, 2023.
9. Zheng L., Wang M., Li Y., Xiong Y., and Wu C., Recycling and Degradation of Polyamides, *Molecules*, **29**(8), 1742, 2024.
10. Yap P.P.X., Yen Z., Salim T., Lim H.C.A., Chung C.K., and Lam Y.M., The Impact of Mechanical Recycling on the Degradation of Polyamide, *Polym. Degrad. Stab.*, **225**, 110773, 2024.
11. Dehghani S., Salehiyan R., and Srithep Y., Mechanical Recycling of Polyamide 6 and Polypropylene for Automotive Applications, *Polym. Eng. Sci.*, **65**(1), 250–257, 2025.
12. Ogunsona E.O., Codou A., Misra M., and Mohanty A.K., A Critical Review on the Fabrication Processes and Performance of Polyamide Biocomposites from a Biofiller Perspective, *Mater. Today Sustain.*, **5**, 100014, 2019.
13. Castanha N., Dantas F.B.H., and Marangoni Júnior L., Mechanical Recycling of Polyamides: A Review, *Trends Food Sci. Technol.*, **162**, 105107, 2025.
14. Plastics, the Facts – An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data, Plastics Europe, 2020.
15. Herzog B., Kohan M.I., Mestemacher S.A., Pagilagan R.U., and Redmond K., Polyamides, In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2013. doi: org/10.1002/14356007.a21_179.pub32013.
16. Deopura B.L., Polyamide Fibers, In: *Polyesters and Polyamides*, Woodhead, 41-61, 2008.
17. Marangoni Júnior L., Cristianini M., and Anjos C.A.R., Packaging Aspects for Processing and Quality of Foods Treated by Pulsed Light, *J. Food Proc. Preserv.*, **44**(11), e14902, 2020.
18. Ding H., Jing C., Guo C., Zhu T., and Zhang K., Closed-Loop Chemical Recycling of Polyamide Thermosets via Reversible Amidation, *Macromolecules*, **58**(13), 6480–6487, 2025.
19. Harings J.A.W., Deshmukh Y.S., Hansen M.R., Graf R., and Rastogi S., Processing of Polyamides in the Presence of Water via Hydrophobic Hydration and Ionic Interactions, *Macromolecules*, **45**(14), 5789–5797, 2012.
20. Feng Y., Quan X., Wang Q. et al., Recent Advances in the Chemical Recycling of Polyamide for a Sustainable Circular Economy, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **64**(5), 2516–2530, 2025.
21. Coeck R., De Bruyne A., Borremans T., Stuyck W., and De Vos D.E., Ammonolytic Hydrogenation of Secondary Amides: An Efficient Method for the Recycling of Long-Chain Polyamides, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **10**(9), 3048–3056, 2022.
22. Hommez B. and Goethals E.J., Degradation of Nylon-6 by Glycolysis. Part 1: Identification of Degradation Products, *J. Macromol. Sci.—Pure Appl. Chem.*, **35**(9), 1489–1505, 1998.
23. Datta J., Błażek K., Włoch M., and Bukowski R., A New Approach to Chemical Recycling of Polyamide 6.6 and Synthesis of Polyurethanes with Recovered Intermediates, *J. Polym. Environ.*, **26**(12), 4415–4429, 2018.
24. Maris J., Bourdon S., Brossard J.M., Cauret L., Fontaine L., and Montembault V., Mechanical Recycling: Compatibilization of Mixed Thermoplastic Wastes, *Polym. Degrad. Stab.*, **147**, 245–266, 2018.
25. *Recyclass Design Book: A Step-by-Step Guide to Plastic Packaging Recyclability*, RecyClass, 2023.
26. Mistretta M.C., Titone V., La Mantia F.P., Pellitteri V., and Botta L., Recycling of a Multilayer Barrier Food Packaging through the Use of a Nanofiller: Effect of Postconsumer Plastic Bag Conditions, *Polym. Test.*, **128**, 108224, 2023.
27. Ragaert K., Delva L., and Van Geem K., Mechanical and Chemical Recycling of Solid Plastic Waste, *Waste Manag.*, **69**, 24–58, 2017.
28. Laredo G.C., Reza J., and Meneses Ruiz E., Hydrothermal

Molded Composites from Discarded Nylon 6/Nylon 6,6 Carpets for Sustainable Industries, *J. Cleaner Prod.*, **117**, 212–220, 2016.

33. Albitres G.A.V., Mendes L.C., and Cestari S.P., Polymer Blends of Polyamide-6/Spandex Fabric Scraps and Recycled Poly(ethylene terephthalate), *J. Therm. Anal. Calorim.*, **129**(3), 1505–1515, 2017.
34. Mägi P., Krumme A., and Pohlak M., Recycling of PA-12 in Additive Manufacturing and the Improvement of its Mechanical Properties, *Key Eng. Mater.*, **674**, 9–14, 2016.
35. Tonsi G., Caccia M., Maesani C. et al., Polyamide Recycling by Selective Dissolution Approach: Life Cycle Assessment Study and Environmental Impacts Comparison with Different Recycling Technologies, *Polym. Eng. Sci.*, **65**(2), 765–782, 2025.

Liquefaction Processes for Plastics Recycling: A Review, *Cleaner Chem. Eng.*, **5**, 100094, 2023.

29. Su K.H., Lin J.H., and Lin C.C., Influence of Reprocessing on the Mechanical Properties and Structure of Polyamide 6, *J. Mater. Proc. Technol.*, **192–193**, 532–538, 2007.
30. Colucci G., Ostrovskaya O., Frache A., Martorana B., and Badini C., The Effect of Mechanical Recycling on the Microstructure and Properties of PA66 Composites Reinforced with Carbon Fibers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **132**(29), 42275, 2015.
31. Bernasconi A., Davoli P., Rossin D., and Armanni C., Effect of Reprocessing on the Fatigue Strength of a Fiberglass Reinforced Polyamide, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **38**(3), 710–718, 2007.
32. Pan G., Zhao Y., Xu H., Hou X., and Yang Y., Compression