Review Article

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 3
Pages 3-22
ISSN: 2252-0449

Polyvinyl Chloride (PVC) Wastes: Challenges and Sustainable Management Solutions

Ali Kord Dezfooli and Fatemeh Rafiemanzelat*

Polymer Chemistry Research Laboratory, Department of Chemistry, University of Isfahan, P.O. Box 81746-73441, Isfahan, Iran

Received: 15 February 2025, Accepted: 5 July 2025

Abstract

Recycling of polyvinyl chloride (PVC) as one of the most widely used polymers is of great importance, due to its environmental and economic benefits. This paper reviews mechanical and chemical recycling methods, innovative methods such as using supercritical fluids, microbial degradation, and industrial recycling techniques for PVC wastes and their challenges. Mechanical methods including separation, washing, shredding, and reprocessing of PVC, are widely used, due to their simplicity and low cost. On the other hand, chemical methods such as pyrolysis, gasification, and dehydrochlorination enable the recovery of high-quality raw materials, but they are less commonly used due to their complexity and higher costs. This paper also highlights the disadvantages of traditional waste management methods, such as incineration and landfilling of PVC. Incineration of PVC leads to the release of toxic gases like dioxins and HCl, which pose serious risks to human health and the environment. Meanwhile, landfilling of PVC causes soil and groundwater contamination, as well as the formation of micro and nano-plastics, due to its non-biodegradability and the leakage of various additives, resulting in long-term environmental issues. Therefore, focusing on innovative recycling methods and precise separation of PVC from impurities such as additives, not only enables the production of high-quality recyclates suitable for diverse applications, but also helps reduce waste volume, prevent the release of hazardous pollutants and preserves valuable resources.

Key Words

**PVC,
waste management,
environment,
mechanical recycling,
chemical recycling**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E–mail: frafiemanzelat@chem.ui.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال پانزدهم، شماره ۳،
صفحه ۲۲-۳، ۱۴۰۴
ISSN: 2252-0449

پسماندهای پلی‌وینیل کلرید (PVC): چالش‌ها و راه‌حل‌های مدیریت پایدار

علی کرد دزفولی و فاطمه رفیع منزلت*

اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده شیمی، آزمایشگاه پژوهشی شیمی پلیمر، صندوق پستی ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۱۴

چکیده

بازیافت پلی‌وینیل کلرید (PVC) به‌عنوان یکی از کاربردی‌ترین پلیمرها، به‌دلیل مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار است. این مطالعه به مرور روش‌های مکانیکی و شیمیایی، روش‌های نوین مانند استفاده از سیال ابربحرانی و ریزاندامگان برای تخریب زیستی و روش‌های صنعتی بازیافت پسماندهای PVC و چالش‌های آن‌ها می‌پردازد. روش‌های مکانیکی شامل جداسازی، شست‌وشو، خردایش و بازفراوری PVC هستند که به‌دلیل سادگی و کم‌هزینه بودن، به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. ازسوی دیگر، روش‌های شیمیایی مانند تفکافت، گازی‌شدن و هیدروکلرزدایی، بازیافت مواد اولیه باکیفیت و جدید را امکان‌پذیر می‌سازند. اما به‌دلیل پیچیدگی و هزینه‌های بیشتر، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. در این مطالعه به معایب روش‌های سنتی مدیریت زباله، مانند سوزاندن و دفن در خاک نیز اشاره می‌شود. سوزاندن PVC به تولید گازهای سمی مانند دیوکسین و هیدروژن کلرید (HCl) منجر می‌شود که برای سلامت انسان و محیط‌زیست خطرناک هستند. ازطرفی، دفن PVC در خاک به‌دلیل تجزیه‌ناپذیری و نشت افزودنی‌های متعدد آن، موجب آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی و تولید میکرو و نانوپلاستیک‌ها می‌شود و مشکلات بلندمدت زیست‌محیطی را ایجاد می‌کند. درنتیجه، توجه به بازیافت PVC با روش‌های نوین و جداسازی PVC از ناخالصی‌هایی مانند افزودنی‌ها، نه‌تنها موجب استفاده بهینه از مواد بازیافتی خالص با کاربردهای متنوع می‌شود، بلکه می‌تواند از انتشار آلاینده‌های خطرناک جلوگیری کرده و منابع ارزشمند را حفظ کند.

علی کرد دزفولی

فاطمه رفیع منزلت

واژگان کلیدی

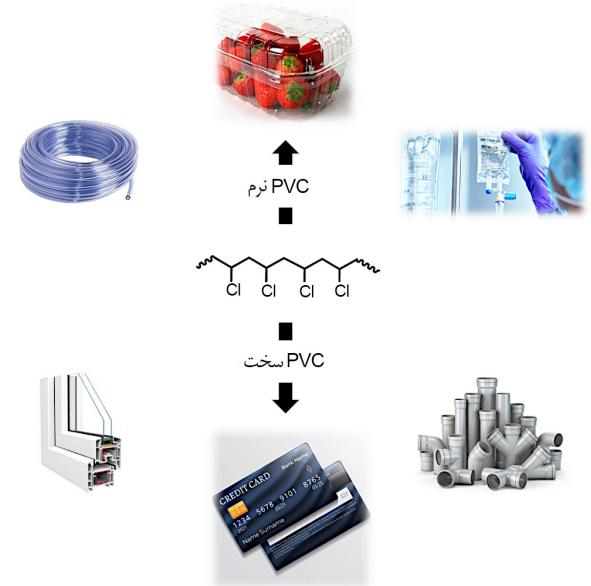
گرمانرم،
مصالح پایدار ساختمانی و راه‌سازی،
خواص مکانیکی،
آسفالت و بتن،
زمین‌ساز

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
frafiemanzelat@chem.ui.ac.ir

مقدمه

پلی‌وینیل‌کلرید (PVC) سومین پلاستیک پرکاربرد پس از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن بوده که دارای خواصی نظیر مقاومت به مواد شیمیایی، ضدشعله و ضدخوردگی است [۱]. ازطرفی، PVC دارای افزودنی‌های مختلف مانند پایدارسازهای گرمایی و نوری، نرم‌کننده‌ها، پرکننده‌ها، اصلاح‌کننده‌های ضربه و رنگ‌دانه‌هاست. PVC با توجه به وجود نرم‌کننده در ساختار آن، دارای دو شکل سخت (UPVC) و نرم (PPVC) است که هریک کاربردهای فراوانی در صنعت ساختمان، بسته‌بندی، پزشکی و خانگی (شکل ۱) دارند [۱]. اما یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های PVC، افزایش تولید پسماندهای این پلاستیک به موازات تولید روبه‌رشدآن (از ٤٤/٣ Mt در سال ۲۰۱۸ میلادی به ۵۲/۷۲ Mt در سال ۲۰۲۵ میلادی) است [۲].

فشارهای زیست‌محیطی در دهه ۱۹۹۰ به طرح پنج چالش برای توسعه پایدار PVC به‌وسیلهٔ چارچوب مرحله‌ای طبیعی (the natural step framework, TNS)، چارچوبی علمی برای دستیابی به توسعه پایدار منجر شده است. اصطلاح پایداری به‌طور گسترده برای نشان دادن ابتکارات، اندیشه‌ها و اقدامات با هدف حفظ منابع استفاده می‌شود و به چهار حوزهٔ اصلی متمایز منابع شامل منابع انسانی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی اشاره دارد که به‌عنوان چهار ستون پایداری شناخته می‌شوند. همچنین به سازمان‌ها، شهرها و جوامع برای حفظ محیط‌زیست کمک می‌کنند. این چالش‌ها برای پیشرفت پایدار در صنعت PVC و سایر مواد و ایجاد برنامه‌های متعهدانه و مدیریتی به‌عنوان نیروی محرکه هستند. مدیریت پسماندهای PVC از چالش‌هایی است که برنامه هایی مانند TNS و VinylPlus® برآن تأکید دارند [۳]. VinylPlus® تعهدی خودجوش ازسوی صنعت PVC اروپا با هدف تقویت شیوه‌های پایدار در تولید، مصرف و بازیافت PVC است. باقی‌ماندن پسماندهای پلیمری در طبیعت، به‌دلیل زیست‌تخریب‌ناپذیری آن‌ها، مشکلات بسیاری را برای سلامت انسان و بوم‌سازگان ایجاد می‌کند. آلودگی و خطر ناشی از نشت افزودنی‌های متنوع PVC را نیز باید به این مشکلات افزود. به‌طورکلی، مدیریت پسماندهای PVC به چند روش اصلی مانند دفن زیر خاک، سوزاندن و بازیافت انجام می‌شود [٤]. هریک از روش‌های سوزاندن و دفن پسماند زیر خاک معایبی دارد که در بخش‌های بعدی بررسی می‌شوند. بهترین راه مدیریت پسماندهای PVC، بازیافت آن است. بازیافت PVC از چالش‌هایی مانند وجود افزودنی‌های مختلف در فرمول‌بندی‌های متفاوت، هیبریدهای PVC و فلزات، کاغذ و سایر مواد پلیمری و وجود انواع آلودگی‌ها برخوردار بوده که در ادامه بررسی شده است.



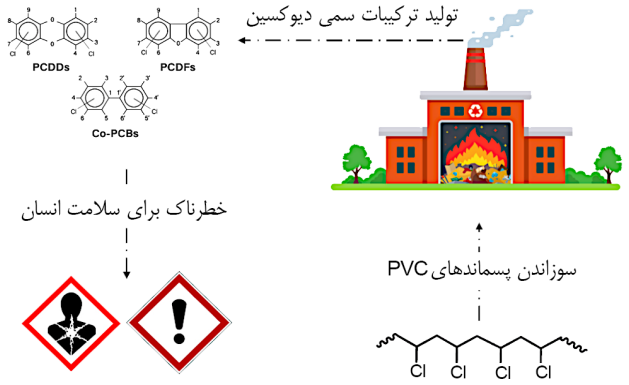
شکل ۱- کاربردهای PVC نرم و سخت [؟؟؟؟].

مزایای بازیافت PVC فراتر از کاهش مقدار پسماند است. استفاده از PVC بازیافتی به تحقق اهداف بهره‌وری منابع و حفظ مواد خام نیزکمک می‌کند. با بازیافت PVC به‌جای اتکای صرف به مواد خام اولیه، می‌توان منابع ارزشمند را حفظ کرد و به رویکرد پایدارتری در مدیریت منابع دست یافت. افزون‌براین، استفاده از PVC بازیافتی باعث کاهش انتشار گازهای سمی در حین سوزاندن وکاهش نیاز به دفن زباله می‌شود. این مسئله، نه‌تنها آثار زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد، بلکه به حل چالش‌های مرتبط با فضای دفن زباله و دورهٔ تجزیهٔ طولانی پسماندهای PVC، تولید ریزپلاستیک‌ها و نشت افزودنی‌ها نیز کمک می‌کند [٤].

مدیریت پسماندهای PVC

سوزاندن و تولید انرژی

سوزاندن زباله، حجم آن را کاهش می‌دهد و انرژی حاصل از آن را می‌توان برای گرمایش یا تولید برق استفاده کرد. بااین‌حال، سوزاندن پسماندهای پلاستیکی باعث انتشار بیش از حد کربن دی‌اکسید (CO_2) می‌شود و ممکن است برخی مواد خطرناک مانند بی‌فنیل‌های پلی‌کلردارشده (PCBs)، دیوکسین‌ها، فوران‌ها و آلاینده‌های آلی پایدار (POPs) را آزاد کند [۵]. افزون‌براین، PVC در دمای بیش از ۱۲۰ °C، آزادسازی گاز هیدروژن کلرید (HCl) آغاز و



شکل ۲- خطر سوزاندن پسماندهای PVC [؟؟؟].

در دماهای بیش از ۳۰۰ °C با شکست زنجیر پلیمر موجب آزادسازی گازهای آروماتیک مانند بنزن و تولوئن می‌شود [۱]. برخی از سایر ساختارهای آروماتیک مانند کلروبنزن و کلروفنول، پیش‌سازهای تولید دیوکسین هستند. نتایج پژوهش‌های زیادی نشانگر آثار سمی دیوکسین‌ها بر سلامت انسان است که موجب سرطان، به‌هم‌خوردن سامانهٔ هورمونی، آثار منفی بر کلیه و سامانه گوارشی می‌شوند (شکل ۲) [٦]. ساختار کلی دیوکسین‌ها شامل دی‌بنزو- پارا- دیوکسین‌های پلی‌کلردارشده (PCDDs)، دی‌بنزوفوران‌های پلی‌کلردارشده (PCDFs) و PCBها است (شکل ۲).

در سال ۲۰۰۷، Yasuhara، Shibamoto و Katami در پژوهشی نشان داد، هرچه مقدار کلر موجود در ساختار پلیمر بیشتر باشد، احتمال آزادسازی دیوکسین‌های بیشتری در حین سوختن ترکیبات وجود دارد. البته عوامل دیگر مانند دما، مقدار اکسیژن و مونواکسیدکربن نیز بر میزان دیوکسین آزادشده مؤثرند [۷].

دفن پسماندها

یکی از روش‌های مدیریت پسماندهای PVC، دفن آن‌ها در زیر خاک است. این روش دارای چالش‌هایی نظیر اشغال فضای زیاد، تجزیهٔ طولانی‌مدت، آلودگی خاک و محیط‌زیست و اتلاف منابع است. دفن پسماندها می‌تواند باعث تشکیل ریزپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها درون خاک [۸]، شست‌وشو و انتقال آن‌ها به آب‌های زیرزمینی شود که درنهایت موجب آسیب به بوم‌سازگان و انسان می‌شود. حجم زیادی از ریزپلاستیک‌ها به‌دلیل افزایش جهانی تولید و استفاده از پلاستیک‌ها، وارد محیط‌زیست شده‌اند. هنگامی که این ذرات وارد محیط‌زیست می‌شوند، حذف آن‌ها عملاً ناممکن است. تنها بازیافت صحیح پلاستیک‌ها در پایان عمر مفید آن‌ها می‌تواند به‌طور مؤثر از گسترش ریزپلاستیک‌ها جلوگیری

شکل ۳- بازیافت مکانیکی پسماندهای PVC [٤].

کند. وجود نرم‌کننده‌های سمی و خطرناک در PVC مانند دی‌اکتیل فتالات (DOP) که قابلیت مهاجرت به سطح آن را نیز دارند و برخی پایدارسازهای گرمایی دارای فلزهای سنگین مانند سرب و کادمیم نیز می‌تواند باعث آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی شود.

بازیافت پسماندهای PVC

بهترین و مؤثرترین روش برای مدیریت پسماندهای PVC بازیافت است. بازیافت، نه‌تنها از آلودگی محیط‌زیست و رخداد خطرهایی بر سلامت انسان جلوگیری می‌کند، بلکه باعث حفظ منابع اولیه می‌شود. بازیافت PVC به دو روش کلی مکانیکی و شیمیایی انجام‌پذیر است.

بازیافت مکانیکی

بازیافت مکانیکی به‌عنوان روش کاملاً رایجی برای بازیافت PVC شناخته می‌شود. این روش شامل فرایندهای مختلف مانند جداسازی، خردایش، آسیاب کردن و تبدیل پسماند به پودر یا گرانول بازیافتی (شکل ۳) است [٤]. این پودر یا گرانول‌ها، قابلیت بالقوهٔ شایان توجهی به‌عنوان مواد خام ارزشمند در کاربردهای مختلف در صنعت ساختمان‌سازی، تولید بطری، لوله، کابل و پشت‌پوش فرش دارند. به‌عنوان مثال، برش‌های باقی‌مانده در صنعت پنجره‌ها می‌توانند حاوی هر دو نوع PVC سخت و نرم باشند که پس از بازفراوری در ساخت کف‌پوش‌های وینیلی (vinyl decking) (نوعی جدید از کف‌پوش‌ها با مقاومت زیاد دربرابر رطوبت)، نرده‌ها یا دیواره‌های دریایی استفاده می‌شوند (شکل ٤) [۹]. اما این پودر یا گرانول‌ها محدودیت‌هایی نیز دارند. به‌عنوان مثال، یکسان نبودن فرمول‌بندی‌های PVC به‌دلیل وجود افزودنی‌ها و پایدارسازها و نانوذرات که می‌توانند فرایند بازیافت را پیچیده‌تر کنند و بر کیفیت مواد بازیافتی اثر بگذارند. همچنین، وجود آلودگی‌های شدید در برخی پسماندها مانند پسماندهای

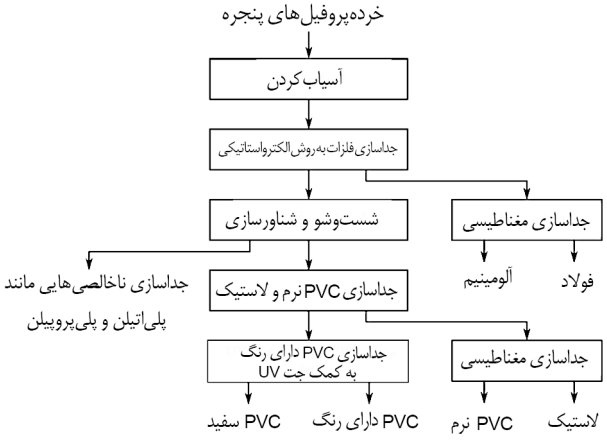
عرشه‌های PVC
دیوارهای دریایی PVC
نرده‌های PVC

شکل ٤- برخی کاربردهای از پسماندهای PVC بازیافتی [؟؟؟].

بیمارستانی نیز یکی دیگر از چالش‌هاست. افزون‌براین، فرایند بازیافت مکانیکی می‌تواند باعث تخریب زنجیر PVC شود که موجب از دست‌رفتن برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی آن شده و درنتیجه، دامنه کاربردهای PVC بازیافتی محدود می‌شود [۱۰].

پسماندهای PVC پیش از مصرف: دسته‌ای از پسماندها هستند که آلودگی‌های اندکی دارند، مانند پسماندهای پیش از مصرف یا پسماندهای تولید و نیز پسماندهای نصب که از تولید یا نصب محصولات PVC ایجاد می‌شوند. به‌عنوان مثال، برش‌های ناشی از نصب کابل‌ها یا کف‌پوش‌ها از این دسته هستند. فراورش‌دهنده‌ها بخشی از پسماندهای پیش از مصرف PVC را به‌صورت داخلی بازیافت می‌کنند، مانند پسماندهای تولیدی ناشی از برش فیلم‌ها که می‌توانند مستقیماً به‌عنوان ماده اولیه در همان فرایند استفاده شوند. بازیافت‌کنندگان بخش دیگر این پسماندها را جمع‌آوری می‌شوند. پسماندهای پیش از مصرف PVC، نسبتاً به‌راحتی و به‌روش مکانیکی بازیافت می‌شوند، زیرا می‌توان آن‌ها را به‌طور جداگانه و با کیفیت‌های مشخص دسته‌بندی و جمع‌آوری کرد.

پسماندهای PVC پس از مصرف: پسماندهای پس از مصرف به‌شکل محصولات نهایی که به پایان عمر کاربری رسیده‌اند مانند لوله‌ها، پنجره‌ها و بسته‌بندی‌ها وجود دارند و اغلب به‌صورت ترکیبی با سایر پسماندها، افزودنی‌ها یا به‌عنوان بخشی از مواد کامپوزیتی یافت می‌شوند. بسته به نوع محصول، PVC ممکن است به‌صورت نسبتاً خالص یا تک‌جزئی در این پسماندها وجود داشته باشد که می‌توان آن را از جریان پسماند با استفاده از فرایندهای جداسازی، استخراج کرد (بطری‌ها، لوله‌ها، برخی فیلم‌ها و پروفیل‌ها). ازسوی دیگر، PVC ممکن است بخشی از محصولات یا مواد کامپوزیتی مانند پنجره‌ها، قطعه‌های خودرو، کف‌پوش‌ها و



شکل ۵- جداسازی ناخالصی از پسماندهای پروفیل پنجره PVC به‌کمک روش‌های الکتروستاتیکی، مغناطیسی، شناورسازی و طیف‌سنجی [۱۱].

کابل‌ها باشد که استخراج آن نیازمند فرایندهای جداسازی یا فراوری مکانیکی پیچیده‌تر است.

روش‌های جداسازی افزودنی‌ها و سایر مواد از PVC: وجود افزودنی‌ها و انواع ناخواستهٔ پلاستیک‌ها در مخلوط پسماند، عملکرد فرایند بازیافت را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. هرچند جداسازی پلاستیک از مواد فلزی مانند فولاد، مس و آلومینیم نسبتاً آسان است، اما جداسازی پلاستیک از پلاستیک، به‌ویژه در مواردی که چگالی و خواص سطحی آن‌ها شبیه به یکدیگر باشد، چالش‌برانگیز است. بدین دلیل، روش‌های متعددی مانند جداسازی گرانشی، مغناطیسی، الکتروستاتیک، شناورسازی و طیف‌سنجی برای جداسازی پلاستیک‌های با خلوص زیاد و قابلیت بازاستفاده توسعه یافته‌اند. در روش شناورسازی، جداسازی مواد جامد براساس خواص سطحی آن‌ها به‌کمک تغییر در آب‌گریزی پلیمرهای مختلف با اصلاح سطح به‌کمک سطح‌فعال‌ها انجام می‌شود.

برای درک بهتر فرایند جداسازی به‌کمک روش‌های مختلف، همان‌طور که در شکل ۵ قابل‌مشاهده است، ابتدا خرده‌پروفیل‌های پنجره آسیاب می‌شوند. در مرحله بعد به‌کمک روش الکتروستاتیکی، قطعه‌های فلزی از مواد پلیمری جدا می‌شوند و با روش الکترومغناطیسی انواع فلزها از یکدیگر جدا می‌شوند. درنهایت به‌وسیله روش شناورسازی، انواع پلیمرها از یکدیگر جدا شده و پس از جداسازی PVC نرم و لاستیک از PVC سخت به روش الکتروستاتیکی با روش طیف‌سنجی، PVC رنگی از سفید جدا می‌شود [۱۱].

افزون‌بر جداسازی پسماندهای PVC از سایر ترکیبات باید

افزودنی‌های PVC مانند نرم‌کننده‌ها و پایدارسازها نیز جدا شوند، زیرا ممکن است بر محصولات حاصل از PVC بازیافتی اثرگذار باشند. به‌عنوان مثال، در پژوهشی در سال ۲۰۲۰ برای جداسازی PVC از سیم‌های مسی موجود در کابل‌ها، ابتدا از n–بوتیل استات برای متورم کردن لایهٔ PVC استفاده شد. سپس با کمک آسیاب میله‌ای، پوشش PVC از روی سیم‌های مسی جدا شد. این فرایند در مدت ٦٠ min با بازده زیاد انجام شد. مهم‌تر از همه، این روش حدود ٪۹۰ از نرم‌کننده‌های فتالاتی موجود در PVC را نیز استخراج کرد [۱۲].

در سال ۲۰۲٤ در پژوهش دیگری از کربن دی‌اکسید(CO_2) به‌عنوان عامل استخراج نرم‌کننده DOP با روش استفاده از سیال ابربحرانی، به‌عنوان روشی نوین، استفاده شد. این گاز از PVC دارای نرم‌کننده عبور داده شد که با مولکول‌های نرم‌کننده واکنش فیزیکی انجام می‌دهد و آن‌ها را حل می‌کند، بدون آنکه هیچ تغییر شیمیایی در زنجیر پلیمری PVC ایجاد کند. سپس CO_2 حاوی نرم‌کننده‌های استخراج‌شده از دستگاه خارج شده و وارد محفظهٔ جداسازی می‌شود. در این مرحله با تغییر شرایط دما و فشار، نرم‌کننده‌ها از CO_2 جدا شده و جمع‌آوری می‌شوند. درحالی‌که مادهٔ PVC به‌طور خالص و بدون آلاینده باقی می‌ماند. این فرایند روش مؤثری و پایدار برای بازیافت PVC و بازگردانی آن به چرخهٔ تولید بدون آلودگی حاصل از وجود نرم‌کننده‌هاست [۱۳].

برخی پسماندهای PVC مانند پسماندهای بیمارستانی دارای آلودگی زیادی هستند. این در حالی است که حدود ٪۲۵ از پسماندهای پلاستیکی بیمارستان‌ها از جنس PVC است که عمدتاً سوزانده می‌شوند. ماسک‌ها و لوله‌های انتقال اکسیژن و کیسه‌های سرم ازجمله مهم‌ترین محصولات پزشکی ساخته‌شده از PVC هستند که برای بازیافت و بازاستفاده، مناسب تشخیص داده شده‌اند. در سال ۲۰۱۸ توسط Qi و همکاران در پژوهشی فرایند نوینی برای کلرزدایی و بازیافت افزودنی‌های موجود در پسماندهای پزشکی PVC شامل لولهٔ انتقال خون (TFT) و ظرف جمع‌آوری نمونهٔ ادرار (SCFU) با استفاده از متانول نزدیک به بحرانی (near-critical methanol, NCM) توسعه داده شد. در شرایط بهینه و مدت زمان واکنش ٦٠ min، بازده کلرزدایی به ٪۹۰ رسید. همچنین، نرم‌کننده‌های فتالاتی مانند DOP از TFT و استرهای متیلی اسیدهای چرب از SCFU به‌خوبی استخراج شدند. متانول نیز به‌عنوان حلال اصلی فرایند ل بازیافت‌پذیر و بازاستفاده بود [۱٤].

کاربردهای پسماندهای PVC در ساخت سایر مواد: اگر روش‌های بازیافت مکانیکی نتواند الزامات لازم برای بازفراوری مواد بازیافتی پس از مصرف را برآورده کند، این مواد با کیفیت کم تولید می‌شوند که به‌دلیل سطح بیشتر آلودگی و مخلوطی از انواع PVC با کاربردهای مختلف، تنها می‌توانند به‌عنوان جایگزینی برای مواد غیر PVC استفاده شوند. به‌عنوان مثال، تعدادی از مقالات از PVC پسماندی برای ساخت بتن سبک‌وزن (چگالی کمتر) یا به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن خودتراکم استفاده کرده‌اند [۱۸–۱۵]. در سال ۲۰۰۹ در پژوهشی خواص بتن‌های سبک‌دانه‌ای بررسی شد که با استفاده از پسماندهای لوله‌های PVC به‌جای ماسهٔ رودخانه‌ای به‌عنوان سنگ‌دانه ریز، ساخته شده بودند. در آزمایش‌های انجام‌شده، ماسهٔ رودخانه‌ای به‌صورت جزئی با گرانول‌های پسماندهای PVC با درصدهای ۰، ۵، ۱۵، ۳۰ و ٪٤۵ حجمی جایگزین شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد، بتن حاوی PVC سبک‌تر (چگالی کمتر)، انعطاف‌پذیرتر، دارای جمع‌شدگی پس از خشک‌شدن کمتر و مقاومت بیشتر دربرابر نفوذ یون کلرید بود. اما مقاومت‌های فشاری و کششی تقسیمی بتن با وجود PVC کاهش یافت [۱٤].

Bolat و Erkus در سال ۲۰۱٦ خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های حاوی PVC را بررسی کردند. در این مطالعه، پودر و گرانول‌های PVC با نسبت‌های حجمی ۱۰، ۲۰ و ٪۳۰ جایگزین سنگ‌دانه‌ها در بتن‌های معمولی با مقاومت زیاد شدند. خواصی مانند اسلامپ، چگالی بتن تازه و سخت‌شده، مقاومت فشاری، جذب آب مویین و سایش در تمام انواع بتن آزمایش شدند. نتایج نشان داد، با افزایش نسبت PVC، وزن مخصوص بتن‌های حاوی پودر PVC به‌ترتیب ٤، ۸ و ٪۱۳ و بتن‌های حاوی گرانول PVC به‌ترتیب ۲، ٤ و ٪۷ کاهش یافته و مقاومت فشاری نیز روند مشابهی را داشت. جذب آب مویینه نیز بین ٪۱۰ تا ٪۵۰ کاهش یافت و مقاومت دربرابر سایش بین ٪۲۷ تا ٪۷۷ بهبود پیدا کرد. این پژوهش نشان می‌دهد، استفاده از PVC در بتن می‌تواند خواصی مانند سبکی و مقاومت دربرابر جذب آب و سایش را بهبود بخشد، اما مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد [۱۵]. در سال ۲۰۱۹ نیز در پژوهشی، پسماندهای PVC به‌شکل گرانول، پودر و سیم خردشده در بتن استفاده شدند. نتایج نشان داد، جایگزینی سنگ‌دانه‌ها با دانه‌های PVC چگالی و مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد، اما از میل‌گردها دربرابر خوردگی محافظت می‌کند. همچنین، افزودن سیم PVC خردشده اثر مثبتی بر مقاومت بتن داشت [۱٦].

در سال ۲۰۲۳، Manjunatha و همکاران استفاده از پودر ضایعات صنعتی PVC به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن خودتراکم را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد، جایگزینی ٪۵ تا ٪۱۰ سیمان

با پودر ضایعات صنعتی PVC، افزون‌بر کاهش هزینه‌ها و آثار زیست‌محیطی، مقاومت و دوام بتن را حفظ می‌کند. این مطالعه ازطریق آزمون‌های مقاومت، تحلیل ریزساختاری و ارزیابی چرخه عمر، کارایی ضایعات صنعتی PVC در بتن خوداتراکم را اثبات کرده است [۱۷]. افزون‌بر بتن سبک‌وزن، ساخت نیمکت‌های پارک‌ها، علائم ترافیکی، محصولات چوب-پلاستیک و زیرهٔ کفش نیز از کاربردهای دیگر پسماندهای PVC با آلودگی زیاد و ترکیب‌های مختلف است.

بازیافت شیمیایی

بازیافت شیمیایی، افزون‌بر بازیافت مکانیکی، نوع دیگری از بازیافت PVC است که درآن پیوندهای شیمیایی پلیمر شکسته یا تغییر می‌کنند تا به مولکول‌ها یا مواد با وزن مولکولی کمتر یا ساختارهای جدید تبدیل شوند [۱۹]. این نوع بازیافت، حجم کمتری از آن را با توجه به نیاز به تجهیزات و فناوری پیشرفته‌تر به‌خود اختصاص می‌دهد. ولی یک فرایند بازیافت شیمیایی ایده‌آل می‌تواند به‌طور کامل از کربن، کلر و هیدروژن موجود در PVC استفاده کند، بدون آنکه آثار منفی بر محیط‌زیست بگذارد.

تجزیه گرمایی: تجزیه گرمایی یکی از راه‌های بازیافت شیمیایی PVC است. افزون‌بر سوختن و تولید انرژی که پیش‌تر دربارهٔ خطرهای زیست‌محیطی آن بحث شد، تفکافت و گازی‌شدن نیز راه‌های دیگر تجزیه گرمایی هستند که خطرهای زیست‌محیطی کمتری دارند و موجب تولید محصولات با ارزش افزوده و بهره‌وری بیشتر از پسماندهای PVC می‌شود. تفکافت، تجزیه گرمایی PVC در نبود اکسیژن به گاز، مایع و جامد است [۲۰].

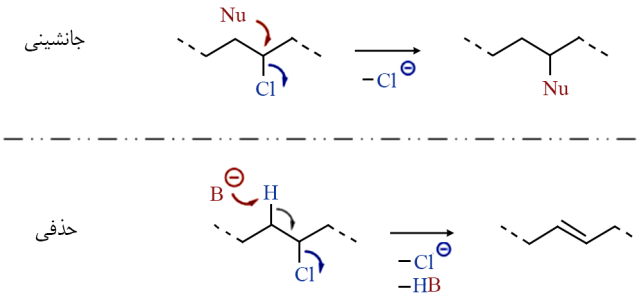
در سال ۲۰۲۵ یعقوب، علی و خالد گزارش کردند، تفکافت PVC به‌دلیل ساختار شیمیایی خاص آن، چالش‌های زیست‌محیطی و فنی به‌همراه دارد. در این فرایند، PVC در دمای زیاد و در نبود اکسیژن تجزیه می‌شود، اما در ازای تولید مقدار شایان توجهی روغن مایع، عمدتاً گازها و جامدها تشکیل می‌شوند. دلیل آن وجود کلر در ساختار PVC است که به تولید HCl منجر می‌شود [۲۰]. با توجه به پژوهش‌های پیشین، تفکافت PVC در محفظهٔ واکنش از نوع بستر ثابت در دمای ۵۰۰ °C، ٪۱۲/۳ مایع و ٪۸۷/۷ گاز و در واکنشگاه ناپیوستهٔ خلأ در دمای ۵۲۰°C، ٪۱۲/۸ مایع، ٪۰/۳٤ گاز و ٪۲۸/۱ جامد تولید می‌کند که نشانگر تولید اندک مایع از PVC به‌روش تفکافت است.

فرایند گازی‌شدن، تبدیل یک ترکیب آلی جامد یا مایع یا مخلوطی از ترکیب‌ها به گازهای اشتعال‌پذیر با گرمادهی در دماهای زیاد (۱۰۰۰ °C تا ۲۰۰۰ °C) در مجاورت عامل اکسنده (اکسیژن، بخار آب، کربن دی‌اکسید یا مخلوطی از آن-ها) است [۲۱]. ازآنجاکه فرایند ازدست دادن HCl در دماهای زیاد سریع است و تشکیل ترکیب‌های آروماتیک و گازی‌شدن به‌طور درخور توجهی کندتر انجام می‌شود، این فرایند به تولید مخلوطی از HCl، کربن مونوکسید، کربن دی‌اکسید، هیدروژن، هیدروکربن‌های گازی و مایع و زغال منجر می‌شود. ترکیب دقیق محصولات به‌شدت به متغیرهای فرایند (دما، مادهٔ بستر و زمان ماند) بستگی دارد. HCl تشکیل‌شده می‌تواند در تولید هیدروکلریک اسید یا پلی‌وینیل کلرید استفاده شود و گاز سنتز نیز می‌تواند برای بازیابی انرژی در سنتز متانول و موارد مشابه به‌کار رود [۲۱]. به‌عنوان مثال، Slapak و همکاران در سال ۱۹۹۹ نشان دادند، در گازی‌شدن PVC با تغییر مادهٔ بستر از کوارتز (SiO_2) به آلومینا (Al_2O_3)، مقدار گاز تشکیل‌شده از ٪۲۵ به ٪۶۹ و با تغییر دما از ۸۷۷ °C به ۹۷۷ °C در مجاورت آلومینا به ٪۹۹ افزایش می‌یابد [۲۲].

تجزیه و اصلاح شیمیایی: افزون‌بر تجزیهٔ گرمایی، یکی از راه‌های بازیافت PVC که به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته است، تجزیه و اصلاح زنجیر PVC به‌کمک مواد شیمیایی و سنتز ترکیبات جدید برای سایر کاربردهاست [۲۳]. PVC دارای اتم کلر به‌عنوان گروه ترک‌کننده است که می‌تواند در واکنش‌های جانشینی یا حذف شرکت کند. اما PVC، بسته به شرایط واکنش و مواد اولیه نظیر دما، نوع حلال، غلظت هسته‌دوست و آرایشمندی در واکنش جانشینی یا حذف شرکت می‌کند (جدول ۱ و شکل ٦) [۲۳]. درنهایت درنظر گرفتن شرایط واکنش موجب سنتز مواد جدید مدنظر برای مصرف پسماندهای PVC می‌شود.

جدول ۱- عوامل مؤثر بر واکنش رقابتی بین حذف و جانشینی در زنجیر PVC [۲۳].

شرایط واکنش و مواد واکنش دهنده		نوع واکنش
دما	زیاد	حذفی
	کم	جانشینی
آرایشمندی	تک‌سوآرایش	جانشینی
	دوسوآرایش	حذفی
	بی‌آرایش	حذفی
حلال	بی‌پروتون	جانشینی
	با پروتون	حذفی
هسته‌دوست	خصلت بازی بیشتر	حذفی
	خصلت بازی کمتر	جانشینی



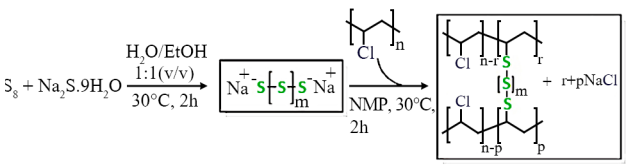
شکل ٦- سازوکار واکنش‌های حذفی و جانشینی در زنجیر PVC [۲۳].

Kameda و همکاران در پژوهشی اتم کلر (Cl) را با گروه تیوسیانات(SCN) به‌عنوان هسته‌دوست جایگزین کردند و اثر نسبت مولی تیوسیانات به کلر، دما و حلال بر جانشینی و حذف HCl بررسی شد. بیشترین میزان جانشینی (بیش از ٦٠٪) در دمای ١٤٠ °C، زمان ٦ h، نسبت ٤ به ١ تیوسیانات به کلر در حلال دی‌متیل فرمامید (DMF) بود. درحالی‌که بیشترین حذف HCl در حلال دی‌متیل سولفوکسید (DMSO) رخ داد [٢٤].

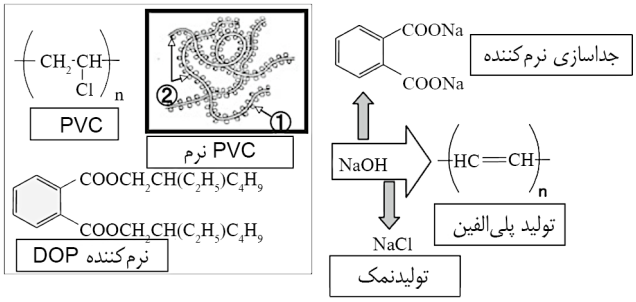
Reinecke و همکاران برای کاهش آلودگی ناشی از نرم‌کننده‌ها در سایر انواع پسماندها در طول فرایند بازیافت، به‌ویژه بازیافت مکانیکی، روشی ایجاد کردند. در این روش، از جایگزینی تیول برای اتصال نرم‌کننده‌های برپایهٔ فتالات‌ها و ایزوفتالات‌ها به PVC استفاده شد [٢٥]. همچنین در سال ٢٠٢٣، Deliballi و همکاران با ایجاد پیوندهای عرضی در PVC به‌کمک گوگرد و سدیم سولفید (شکل ٧) راهی برای بازفراوری و بازیافت PVC ازطریق پیوندهای پویا میان اتم‌های گوگرد (S–S) پیشنهاد دادند که درعین‌حال از نشت نرم‌کننده به‌واسطه تشکیل شبکه نیز جلوگیری می‌کند [٢٦].

افزون‌بر واکنش‌های جانشینی، استفاده از بازها (Na_2CO_3، NaOH و NH_3) می‌تواند طی یک واکنش حذفی (شکل ٨)، که به هیدروکلرزدایی معروف است، به تولید نمک‌ها (NaCl، NaH و Na_2CO_3) و پلی‌اولفین‌ها از پسماندهای PVC منجر شود [٢٣].

Osada و Yana در سال ٢٠١٠ موفق شدند، فرایند هیدروکلرزدایی را با استفاده از تغییر دما و به‌کارگیری گرمایش ریزموج در محلول NaOH ٨ M انجام دهند. در این روش، آب‌کافت DOP در دمای



شکل ٧- ایجاد اتصال عرضی میان زنجیرهای PVC با پیوندهای پویا S-S، با قابلیت برگشت‌پذیری و بازفراوری [٢٦].

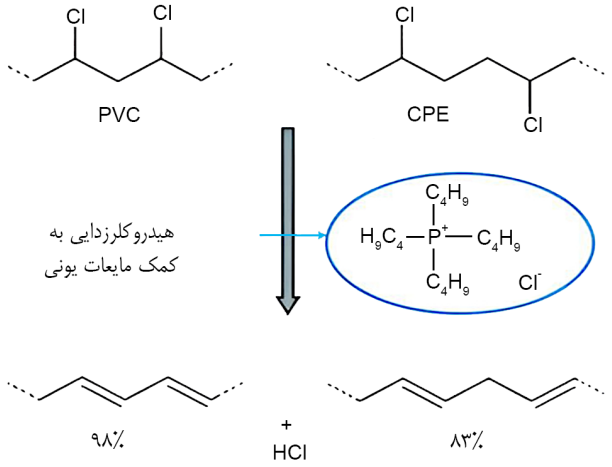


شکل ٨- تولید نمک و پلی‌اولفین از پسماندهای PVC به‌کمک باز NaOH [٢٧].

١٥٠ °C انجام گرفت، درحالی‌که حذف کامل کلر (١٠٠٪) در دمای ٢٣٥ °C و مدت زمان کوتاه ٣٠ min به‌دست آمد (شکل ٨). این رویکرد نوآورانه امکان انجام دو فرایند مهم در یک سامانه واحد را فراهم کرده است و گامی مؤثر برای بهبود روش‌های بازیافت و مدیریت پسماندهای PVC محسوب می‌شود [٢٧].

اگرچه مدت این واکنش کوتاه بود، ولی از باز با غلظت زیاد (سود ٨ M) استفاده شد. بدین دلیل، پژوهش‌هایی انجام شد تا با ترکیب دی‌ال‌ها (اتیلن گلیکول، دی‌اتیلن گلیکول وتترااتیلن گلیکول) با NaOH [٢٨] یا استفاده هم‌زمان از اتیلن گلیکول و NaOH در کنار آسیاب گلوله‌ای، غلظت NaOH را به ١ M کاهش دهند.

Glas و همکاران در سال ٢٠١٤، فرایند هیدروکلرزدایی پسماندهای PVC را با استفاده از مایعات یونی پیشنهاد دادند (شکل ٩). آن‌ها موفق به انجام ٩٨٪ هیدروژن کلرزدایی در دمای ١٨٠ °C و مدت ٦٠ min و مجاورت با مایع یونی ترابوتیل-فسفونیوم‌کلرید (PBu_4Cl) شدند [٢٩]. پلی‌اولفین‌های تشکیل‌شده به‌دلیل ساختارهای اشباع‌نشده پس از حذف HCl و نامحلول بودن



شکل ٩- هیدروکلرزدایی PVC به‌کمک مایع یونی PBu_4Cl [٢٩].

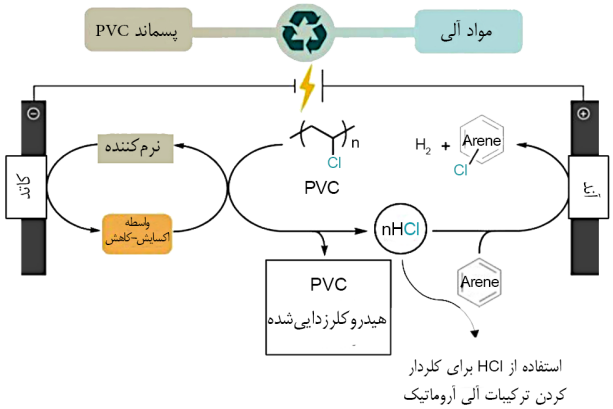
کاربرد فراوانی ندارند و باید راهی برای استفاده از آن‌ها پیدا کرد [۲۳]. O'Rourke و همکاران درسال ۲۰۲۳ با هیدروژن‌دار کردن ساختارهای اشباع‌نشده پلی‌استیلن (حاصل از هیدروکلرزدایی PVC با مایع یونی PBu_4Cl) به‌کمک کاتالیزگر رادیم و گاز هیدروژن، آن را به پلیمر محلول غیرخطی اشباع تبدیل کردند که شبیه مواد پلی‌اتیلنی است و قابلیت استفاده در کاربردهای پلی‌اتیلنی را دارد [۳۰]. Svadlenak و همکاران نیز در سال ۲۰۲۳، روش دیگری برای هیدروژن‌دار کردن ساختارهای اشباع‌نشده حاصل از PVC هیدروکلرزدایی‌شده با باز آلی N،N–دی‌متیل‌هگزیل‌آمین به‌کمک کاتالیزگر پلاتین و گاز هیدروژن برای ساخت موم‌های پلی‌اتیلنی با کاربرد چسب‌های ذوبی را پیشنهاد دادند [۳۱].

فناوری‌های نوین در بازیافت PVC

افزون‌بر روش‌های پیش‌گفته، به‌تازگی روش‌هایی مانند بازیافت زیستی، بازیافت الکتروشیمیایی، چاپ سه‌بعدی، انحلال و استخراج PVC و استخراج PVC به‌کمک سیالات ابربحرانی به‌عنوان فناوری‌های جدید در بازیافت PVC مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به سازگاری این فرایندها با محیط‌زیست باید شرایط تجاری‌سازی و قابلیت استفاده از آن‌ها در مقیاس صنعتی فراهم شود [٤].

تلاش بر این است که در بازیافت زیستی با استفاده از ریزاندامگان و آنزیم‌ها، PVC به مواد کوچک‌تر با وزن مولکولی کمتر تبدیل شود [۳۲]. در مطالعهٔ انجام‌گرفته در سال ۲۰۱۹، پنج سویهٔ باکتری برای بررسی قابلیت آن‌ها در تخریب زیستی PVC در شرایط هوازی آزمایش شدند. پس از ۹۰ روز گرم‌خانه‌گذاری با وجود دو باکتری Pseudomonas citronellolis و Bacillus flexus، نشانه‌هایی از تخریب زیستی مشاهده شد .درنهایت مشخص شد، فعالیت باکتری‌ها بیشتر به سمت افزودنی‌های موجود در PVC معطوف بوده و حمله به زنجیرهای پلیمری PVC نیز به میزان اندکی انجام شده است. این موضوع از کاهش وزن مولکولی عددی PVC مشخص شد. Pseudomonas citronellolis حتی بدون سترون‌سازی اولیه، قابلیت تخریب فیلم‌های پسماند PVC پس از ۳۰ روز بود. این نتایج نشانگر قابلیت بالقوهٔ زیاد این باکتری در تخریب زیستی PVC در شرایط هوازی است [۳۳].

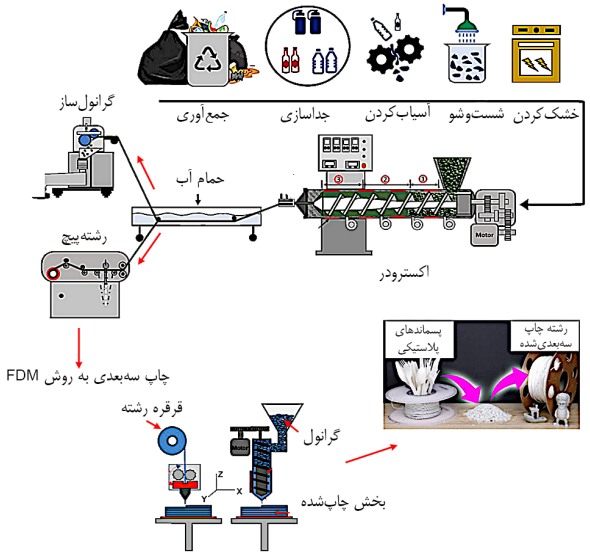
با اعمال جریان الکتریکی بر پسماندهای PVC در مجاورت الکترولیت، مولکول‌های PVC تفکیک و به مواد اولیهٔ ساده مانند کلر و کربن تبدیل می‌شوند. به‌عنوان مثال با استفاده از الکترولیز جفت‌شده، HCl تولیدشده از PVC برای کلردارکردن مواد



شکل ۱۰– هیدروکلرزدایی PVC به روش الکتروشیمیایی و استفاده از HCl حاصل برای کلردارکردن ترکیبات آلی آروماتیک [۳٤].

آروماتیک به‌کار گرفته شده است (شکل ۱۰). این روش حتی با وجود سایر پسماندهای پلاستیکی و شرایط محیطی (مانند هوا و رطوبت) کارایی دارد و موجب کاهش درخور توجه تولید گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با استفاده از HCl برای تولید مواد آروماتیک کلردار می‌شود [۳٤].

خردایش و فراوری پسماندهای PVC به‌شکل رشته یا پودر می‌تواند به‌عنوان مادهٔ اولیه در چاپ سه‌بعدی استفاده شود. این رویکرد، امکان استفاده مستقیم و کارآمد از پسماندهای PVC را به‌عنوان مادهٔ اولیه ارزشمندی برای تولید محصولات جدید فراهم می‌کند و درنتیجه وابستگی به مواد PVC خام را کاهش می‌دهد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱– استفاده از مواد بازیافتی در تولید رشته برای چاپگرهای سه‌بعدی برای تولید محصولات با ارزش افزوده [۳۵].

انحلال و استخراج PVC از مواد کامپوزیتی به‌کمک حلال می‌تواند برای جداسازی PVC از مواد ترکیبی بسیار کارآمد باشد. یکی از کارآمدترین روش‌های بازیافت به‌کمک انحلال که در مقیاس تجاری نیز عملی شده بود، فرایند VinyLoop بود. در این فرایند، PVC به‌کمک آب، متیل‌اتیل‌کتون و هگزان بازیافت می‌شد، ولی به‌دلیل نداشتن قابلیت جداسازی نرم‌کننده‌های سمی پس از ۱۶ سال، در سال ۲۰۱۸ به‌کار خود پایان داد. در عوض استخراج PVC به‌کمک سیال ابربحرانی روش نوآورانه سبزی برای بازیافت PVC است که از سیال ابربحرانی، معمولاً کربن دی‌اکسید (CO_2)، به‌عنوان حلال برای استخراج گزینشی PVC از مواد پسماند استفاده می‌کند. این روش به‌دلیل غیرسمی بودن و اشتعال‌ناپذیری و همچنین قابلیت جداسازی افزودنی‌های PVC می‌تواند روش نوآورانه و بهینه‌ای برای بازیافت پسماندهای PVC باشد، ولی به‌دلیل نیاز به تجهیزات با فشار زیاد دارای محدودیت است [٤].

روش‌های تجاری‌شده در بازیافت PVC

در این بخش، تعدادی از روش‌های بازیافت PVC شامل مکانیکی، شیمیایی و سوزاندن و تولید انرژی که در مقیاس صنعتی به‌کار گرفته شده‌اند، در جدول ۲ نشان داده شده است [٤].

نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی راه‌های اصلی مدیریت پسماندهای PVC و نیز معایب و مزایای هریک از آن‌ها، انتظار می‌رود تا در آینده استفاده از روش‌های سوزاندن پسماند به‌دلیل آزادسازی گازها و ترکیبات سمی مانند دیوکسین به‌حداقل برسد که می‌تواند بر سلامت انسان و محیط‌زیست اثر منفی داشته باشد. همچنین

جدول۲- انواع روش‌های صنعتی بازیافت PVC [٤].

نام روش	کشور	نوع بازیافت	توضیح
R-Inversatech	ژاپن	مکانیکی	این فناوری با استفاده از فرایند ضربه‌زنی پرسرعت، الیاف را از PVC در پسماندهایی مانند برزنت جدا می‌کند. این الیاف می‌توانند کاربردهای بالقوه‌ای در عایق‌کاری گرمایی و صوتی داشته باشند. محصول دیگر این فرایند، گرانول بازیافتی PVC است که می‌تواند در طیف گسترده‌ای از کاربردهای PVC نرم استفاده شود.
Texyloop®	ایتالیا	مکانیکی	به فراوری پارچه‌های پوشش‌دار با هدف بازیافت هم‌زمان PVC و الیاف پلی‌استر می‌پردازد.
Sumitomo	ژاپن	شیمیایی (گازی‌شدن)	این فرایند سامانهٔ گازی‌شدن و ذوب خاکستر ثانویهٔ پسماندهای پلاستیکی است که از فناوری‌های مشابه تولید آهن و فولاد استفاده می‌کند. این فرایند قابلیت فراوری پسماندهای پلاستیکی مخلوط و خالص PVC را دارد.
Ebara	ژاپن	شیمیایی (گازی‌شدن)	این فرایند ترکیبی از گازی‌شدن با بستر سیال دوار و فناوری ذوب خاکستر است که پسماندهای پلاستیکی مخلوط (با حداکثر ٪۵ کلر) را در دو مرحله گازی‌شدن (دماکم و دمازیاد) فراوری و سرباره پایدار و گاز سنتز تولید می‌کند. گاز سنتز در کاربردهایی مانند تولید متانول، هیدروژن و انرژی استفاده می‌شود و کلر به‌صورت آمونیوم کلرید بازیابی می‌شود که به‌عنوان کود کاربرد دارد.
Alzchem	آلمان	شیمیایی (هیدروکلرزدایی)	این فرایند شامل استفاده از اکسترودر بالادستی با دمای زیاد برای تجزیهٔ PVC است. این روش به‌طور مؤثر کلر را از جریان پسماند پلاستیک حذف کرده و درعین‌حال HCl را بازیابی می‌کند. HCl حاصل از این فرایند می‌تواند به‌صورت محلول آبی به فروش برسد.
SUEZ	آلمان	سوزاندن (تولید HCl و انرژی)	این فرایند قابلیت مدیریت پسماندهای مختلط PVC، روغن آلوده، لجن زیستی و مواد جامد خطرناک حاوی مواد کلردار را دارد که طی آن HCl و انرژی بازیابی می‌شوند. بهطور متوسط ٪۹۰ از کلر موجود در PVC ورودی به‌شکل ٪۲۰ HCl (آبی) بازیابی می‌شود. برای فراوری پسماندهای PVC در کورهٔ دوار، پسماندهای با ارزش حرارتی زیاد به آن اضافه می‌شوند تا احتراق پشتیبانی شود. درنهایت، بازیابی انرژی کلی برای PVC به مقدار ٪۵۰ می‌رسد.

روش دفن پسماند، به‌دلیل آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی نیز توصیه نمی‌شود. روش‌های مناسب می‌تواند هیدروکلرزدایی و خارج کردن فلزهای سنگین موجود در پایدارسازهای PVC یا استفاده از آنزیم‌ها و ریزاندامگان برای تخریب زنجیر پلیمری و تبدیل آن به مولکول‌های کوچک‌تر، پیش از دفن پسماند باشد. روش بازیافت فیزیکی، به‌دلیل مراحل مختلف مانند جداسازی، خردایش و شست‌وشو نیازمند وجود دستگاه‌های پیشرفته با دقت زیاد در تفکیک پسماندها از یکدیگر است؛ مانند PVC نرم از PVC سخت، جداسازی براساس تک‌جزئی، کامپوزیت یا هیبرید بودن پسماندها و در برخی مواد مانند کابل‌ها که دارای فلزند یا کامپوزیت‌های پلیمری که دارای PVC هستند. بازیافت پسماندهای پیش از مصرف به‌دلیل راحتی و نیاز به هزینه و تجهیزات کمتر نسبت به پسماندهای پس از مصرف، باید بیش از پیش مورد توجه صنعتگران باشد. انتخاب شرایط بهینه مانند نوع محفظهٔ واکنش در روش گازی‌شدن اثر زیادی بر افزایش بازده تولید گاز نهایی دارد و توجه به این موضوع می‌تواند باعث صرفه‌جویی در هزینه و انرژی شود. در بازیافت‌های شیمیایی با باز یا هسته‌دوست، به‌دلیل رقابت میان واکنش حذفی و جانشینی، محصول نهایی می‌تواند متغیر باشد. درنتیجه برای افزایش بهره‌وری باید پیش از انتخاب روش، هدف از محصول و کاربرد نهایی مشخص و روش و شرایط واکنش بهینه‌سازی شود. انتظار می‌رود، روش‌هایی مانند تولید نمک و پلی‌اولفین‌ها به‌کمک باز و هیدروژن‌دار کردن آن‌ها با روش‌های مختلف به‌سبب تولید محصولات شبه‌پلی‌اتیلنی و کاربردهای فراوان آن‌ها بیشتر مورد توجه قرار گیرد. تولید و بازار PVC به‌دلیل خواص و کاربردهای متعددی که دارد، روبه‌رشد است. همین مسئله موجب تولید روزافزون پسماندهای PVC شده است که نیاز جدی به مدیریت دارد. PVC به‌دلیل ماهیت شیمیایی و وجود اتم کلر در حین سوختن می‌تواند موجب تولید ترکیبات سمی شود. همچنین دارای افزودنی‌های متعددی است که در حین دفن و ماندن در طبیعت، محیط‌زیست را آلوده می‌کند. وجود این چالش‌ها نیازمند برنامه‌ریزی و استفاده از روش‌های جدید و نوآورانه بازیافت مکانیکی و شیمیایی به‌کمک الگوبرداری از روش‌های صنعتی است تا افزون‌بر حفظ انرژی و مواد اولیه از آلودگی زیست‌محیطی جلوگیری شود. دراین‌میان، توجه به روش‌های نوین و تلاش برای اقتصادی‌تر کردن آن‌ها به‌دلیل کارایی بیشتر و سازگاری با محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای در تولید و مصرف پایدار PVC برخوردار است.

مراجع

1. Yu J., Sun L., Ma C., Qiao Y., and Yao H., Thermal Degradation of PVC: A Review, *Waste Manag.*, **48**, 300-314, 2016.
2. Jaganmohan M., Polyvinyl Chloride (PVC) Production Volume Worldwide in 2018 and 2025. https://www.statista.com/statistics/720296/global-polyvinyl-chloride-market-size-in-tons/, available in 2024.
3. Everard M., Twenty Years of the Polyvinyl Chloride Sustainability Challenges, *J. Vinyl Addit. Technol.*, **26**, 390-402, 2020.
4. Ait‐Touchente Z., Khellaf M., Raffin G., Lebaz N., and Elaissari A., Recent Advances in Polyvinyl Chloride (PVC) Recycling, *Polym. Adv. Technol.*, **35**, 6228, 2024.
5. Lu L., Li W., Cheng Y., and Liu M., Chemical Recycling Technologies for PVC Waste and PVC-Containing Plastic Waste: A Review, *Waste Manag.*, **166**, 245-258, 2023.
6. Mitrou P., Dimitriadis G., and Raptis S., Toxic Effects of 2, 3, 7, 8-Tetrachlorodibenzo-p-Dioxin and Related Compounds, *Eur. J. Int. Med.*, **12**, 406-411, 2001.
7. Shibamoto T., Yasuhara A., and Katami T., Dioxin Formation From Waste Incineration, *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, **190**, 1-41, 2007.
8. Puthcharoen A. and Leungprasert S., Determination of Microplastics in Soil and Leachate From the Landfills, *Thai Environ. Eng. J.*, **33**(3), 39-46, 2019.
9. Decaria D., An Update on PVC Plastic Circularity and Emerging Advanced Recovery Technologies for End‐Of‐Life PVC Materials, Technology Innovation for the Circular Economy: Recycling, Remanufacturing, Design, Systems Analysis and Logistics, 379-393, 2024.
10. La Mantia F.P., *Recycling of PVC and Mixed Plastic Waste*, Chemtec, 1996.
11. Lewandowski K. and Skórczewska K., A Brief Review of Poly(vinyl chloride)(PVC) Recycling, *Polymers*, **14**, 3035, 2022.
12. Kumar H., Kumagai S., Kameda T., Saito Y., and Yoshioka T., Highly Efficient Recovery of High-Purity Cu, PVC, and Phthalate Plasticizer from Waste Wire Harnesses Through PVC Swelling and Rod Milling, *React. Chem. Eng.*, **5**, 1805-1813, 2020.
13. Versteeg F.A., Bollen D.A., and Picchioni F., Recycling PVC with $SCCO_2$: From Soft to Rigid PVC, *ACS Sustain. Chem.*

Eng., **12**, 15398-15408, 2024.

14. Qi Y. et al., A Novel Treatment Method of PVC-Medical Waste by Near-Critical Methanol: Dechlorination and Additives Recovery, *Waste Manag.*, **80**, 1-9, 2018.
15. Kou S., Lee G., Poon C.S., and Lai W.L., Properties of Lightweight Aggregate Concrete Prepared with PVC Granules Derived from Scraped PVC Pipes, *Waste Manag.*, **29**, 621-628, 2009.
16. Bolat H. and Erkus P., Use of Polyvinyl Chloride (PVC) Powder and Granules as Aggregate Replacement in Concrete Mixtures., *Sci. Eng. Compos. Mater.*, **23**, 209-216, 2016.
17. Mohammed A., 6-Mechanical Strength of Concrete With PVC Aggregates, in: *Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete*, Elsevier, 115-135, 2019.
18. Manjunatha M., Seth D., Balaji K., Roy S., and Tangadagi R.B., Utilization of Industrial-Based PVC Waste Powder in Self-Compacting Concrete: A Sustainable Building Material, *J. Clean. Prod.*, **428**, 139428, 2023.
19. Zhang F. et al., From Trash to Treasure: Chemical Recycling and Upcycling of Commodity Plastic Waste to Fuels, High-Valued Chemicals and Advanced Materials, *J. Energy Chem.*, **69**, 369-388, 2022.
20. Yaqoob H., Ali H.M., and Khalid U., Pyrolysis of Waste Plastics for Alternative Fuel: A Review of Key Factors, *RSC Sustain.*, 1, 2025.
21. Zakharyan E., Petrukhina N., Dzhabarov E., and Maksimov A., Pathways of Chemical Recycling of Polyvinyl Chloride. Part 2, *Rus. J. Appl. Chem.*, **93**, 1445-1490, 2020.
22. Slapak M.J., Van Kasteren J.M., and Drinkenburg B.A., Hydrothermal Recycling of PVC in a Bubbling Fluidized Bed Reactor: The Influence of Bed Material and Temperature, *Polym. Adv. Techn.*, **10**, 596-602, 1999.
23. Jha R.K., Neyhouse B.J., Young M.S., Fagnani D.E., and Mcneil A.J., Revisiting Poly(vinyl chloride) Reactivity in the Context of Chemical Recycling, *Chem. Sci.*, **15**, 5802-5813, 2024.
24. Kameda T., Ono M., Grause G., Mizoguchi T., and Yoshioka T., Chemical Modification and Dechlorination of Polyvinyl Chloride by Substitution with Thiocyanate as a Nucleophile, *Polym. Eng. Sci.*, **50**, 69-75, 2010.
25. Navarro R., Perez Perrino M., Gomez Tardajos M., and Reinecke H., Phthalate Plasticizers Covalently Bound to PVC: Plasticization with Suppressed Migration, *Macromolecules*, **43**, 2377-2381, 2010.
26. Deliballi Z., Demir‐Cakan R., Kiskan B., and Yagci Y., Self‐Healable and Recyclable Sulfur Rich Poly(vinyl chloride) by S–S Dynamic Bonding, *Macromol. Chem. Phys.*, **224**, 2100423, 2023.
27. Osada F. and Yana J., Deplasticization and Dechlorination of Flexible Polyvinyl Chloride in Naoh Solution by Microwave Heating, *J. Mater. Cycle. Waste Manag.*, **12**, 245-253, 2010.
28. Jabrail F.H., Awad H.M., and Matlob A.A., Dechlorination of Landfill Poly(vinyl chloride) Waste and Estimation of Recovered Chlorine, *Polym. Polym. Compos.*, **29**, 1273-1281, 2021.
29. Glas D., Hulsbosch J., Dubois P., Binnemans K., and De Vos D.E., End‐of‐Life Treatment of Poly(vinyl chloride) and Chlorinated Polyethylene by Dehydrochlorination in Ionic Liquids, *Chemsuschem*, **7**, 610-617, 2014.
30. O'Rourke G., Hennebel T., Stalpaert M. et al., Catalytic Tandem Dehydrochlorination–Hydrogenation of PVC Towards Valorisation of Chlorinated Plastic Waste, *Chem. Sci.*, **14**, 4401-4412, 2023.
31. Svadlenak S., Wojcik S., Ogunlalu O. et al., Upcycling of Polyvinyl Chloride to Hydrocarbon Waxes via Dechlorination and Catalytic Hydrogenation, *Appl. Cataly. B: Environ.*, **338**, 123065, 2023.
32. Kudzin M.H., Piwowarska D., Festinger N., and Chruściel J.J., Risks Associated with the Presence of Polyvinyl Chloride in the Environment and Methods for Its Disposal and Utilization, *Materials*, **17**, 173, 2023.
33. Giacomucci L., Raddadi N., Soccio M., Lotti N., and Fava F., Polyvinyl Chloride Biodegradation By Pseudomonas Citronellolis and Bacillus Flexus, *N. Biotechnol.*, **52**, 35-41, 2019.
34. Fagnani D.E., Kim D., Camarero S.I., Alfaro J.F., and Mcneil A.J., Using Waste Poly(vinyl chloride) to Synthesize Chloroarenes by Plasticizer-Mediated Electro (De) Chlorination, *Nat. Chem.*, **15**, 222-229, 2023.
35. Hassan M., Mohanty A.K., and Misra M.,3 D Printing in Upcycling Plastic and Biomass Waste to Sustainable Polymer Blends and Composites: A Review, *Mater. Des.*, **237**, 112558, 2024.