

راه کاری پایدار برای بازیافت بسته بندی های آسپتیک چندلایه

پویا شعاعی، علی رضا بازارگان*

دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

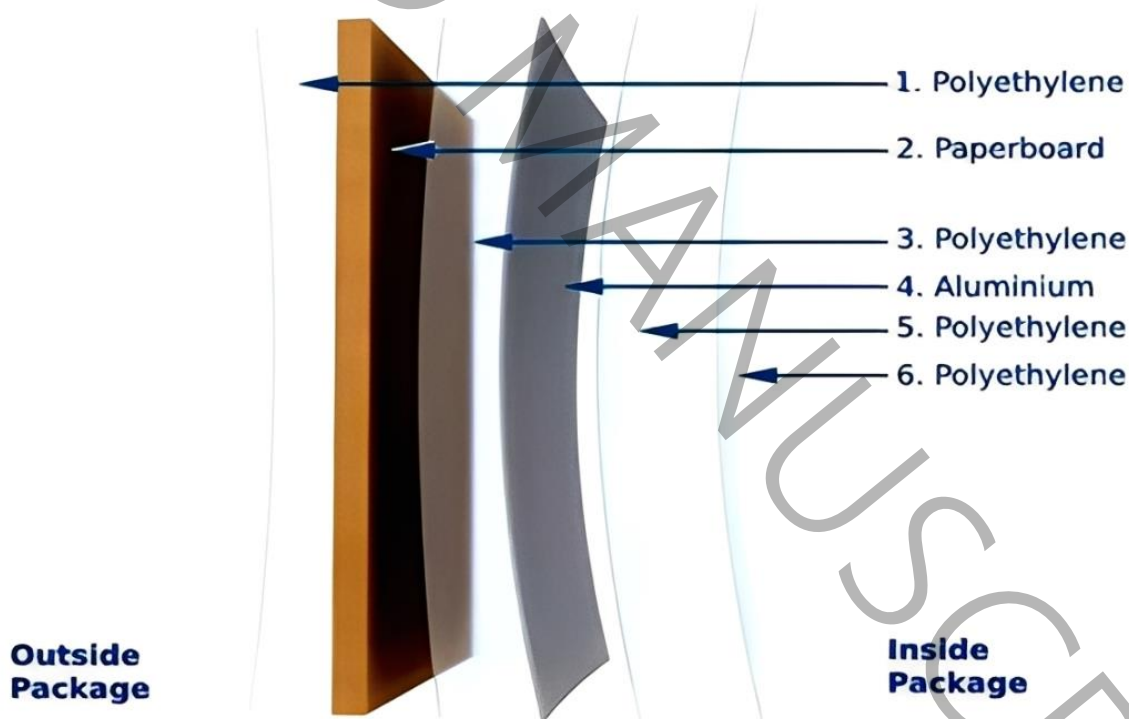
* نویسنده مسئول: alireza.bazargan@ut.ac.ir

چکیده: بازیافت کارتن های آسپتیک به دلیل ساختار چندلایه با چالش های زیادی مواجه است. این پژوهش به منظور بهینه سازی فرآیند انحلال پلی اتیلن کم چگالی (LDPE) و ارائه روشی کارآمد برای بازیافت مؤثر این مواد انجام شد. کارتن ها از برندهای مختلف جمع آوری، شسته و خشک شدند و انحلال LDPE با ترکیبی از حلال های زایلن، تولوئن و بنزین صورت گرفت. با استفاده از طراحی آزمایش Plackett-Burman، پارامترهای مؤثر بر انحلال شناسایی شدند. نتایج نشان داد که نسبت بهینه حلال ها برای انحلال LDPE به صورت بنزین:زایلن:تولوئن (۵۰:۲۵:۲۵) حجم/حجم است. پارامترهای مؤثر به ترتیب شامل نسبت جامد به مایع، درزهای دولایه، دما و زمان بودند. در شرایط بهینه (۱۲۰ درجه سلسیوس و ۳۰ دقیقه)، انحلال کامل LDPE برای تمامی برندها به دست آمد. درصد بازیابی LDPE و حلال به ترتیب ۱۰۰٪ و ۹۰٪ بود. روش های متداول جداسازی آلومینیوم از کاغذ موفق نبودند، اما استفاده از جداساز جریان گردابی (ECS) برای این منظور مناسب تشخیص داده شد. علاوه بر این، حذف مرحله هیدروپالپینگ از فرآیند بازیافت، موجب بهبود انحلال LDPE شد. این پژوهش می تواند به توسعه روش های بازیافت کارآمدتر و مدیریت پایدار پسماند کمک کرده و گامی در جهت تحقق اقتصاد چرخشی باشد. برای اجرای صنعتی این روش، مطالعات بیشتری در زمینه مقیاس پذیری، ارزیابی اقتصادی و اثرات محیط زیستی مورد نیاز است.

واژگان کلیدی: تتراپک؛ کارتن های آسپتیک؛ کامپوزیت های چندلایه؛ بازیافت شیمیایی؛ جداسازی جریان

گردابی

بسته‌بندی آسپتیک به طور گسترده در صنایع دارویی و غذایی استفاده می‌شود. این بسته‌بندی، عمر نگهداری محصول درون آن را برای چندین ماه در مقایسه با ظروف غیرآسپتیک افزایش می‌دهد [۱]. مواد بسته‌بندی آسپتیک به طور معمول Tetra Pak (TP) نامیده می‌شوند که به شرکت پیشرو در این بازار اشاره دارد [۲]. TP تقریباً شامل ۲۵ درصد وزنی پلی‌اتیلن با چگالی پایین (LDPE)، ۷۰ درصد کاغذ و ۵ درصد آلومینیوم است که به صورت لایه‌های تلفیق‌شده قرار دارند (شکل ۱). ساختار یک ظرف TP به گونه‌ای است که از عبور اکسیژن، نور و رطوبت جلوگیری می‌کند [۳، ۴]. با وجود این که استفاده از کارتن‌های نوشیدنی عملکرد ظروف را بهبود بخشیده است، اما برای شرکت‌های مدیریت پسماند در دسرساز هستند [۵]. در مقایسه با ظروف سنتی شیشه‌ای یا پلاستیکی که می‌توانند به راحتی جدا و فرآوری شوند، بازیافت ظروف چندلایه آسپتیک کامپوزیتی به طور چشمگیری دشوار هستند. به طور تناقض‌آمیز، هر سه جزء (کاغذ، پلاستیک و آلومینیوم) در کارتن‌های نوشیدنی کامپوزیتی خود قابل بازیافت هستند، اما بازیافت مواد در یک ماتریس کامپوزیتی دشوارتر است. الیاف بلند کاغذ مورد استفاده در TP از کیفیت بالایی برخوردارند و می‌توانند به سایر محصولات کاغذ بازیافت‌شده تبدیل شوند، اما وجود آثار پلاستیک و آلومینیوم در کاغذ چنین بازیافتی را مختل می‌کند، از این رو جداسازی الیاف کاغذ از دو ماده دیگر ضروری است [۶].



شکل ۱. ساختار معمول یک کارتن آسپتیک [۷].

Figure 1. Typical structure of an aseptic carton [7].

براساس مشاهده این که اقتصاد امروزی "بگیر-بساز-دور بریز" یکی از محرک‌های تغییرات محیط‌زیست جهانی است، مفهوم اقتصاد چرخشی به عنوان ابزاری برای جلوگیری بیشتر از فعالیت‌های زیان‌بار انسان توسعه یافته است [۸، ۹]. اقتصاد چرخشی بر بستن حلقه‌های موجود در سیستم‌های صنعتی، کاهش زباله و کاهش ورودی‌های مواد خام و انرژی تأکید دارد.

راه‌حل‌های عملی به سمت اقتصاد چرخشی شامل برنامه‌های پیشگیری از ضایعات و افزایش عمر محصولات است. اصل کاهش هدف کمینه‌سازی استفاده از مواد خام، ورودی انرژی و تولید ضایعات را دنبال می‌کند، در حالی که اصل استفاده مجدد به استفاده مکرر از محصولات یا اجزای آن‌ها برای هدف مورد نظر اشاره دارد [۱۰]. بازیافت عمدتاً برای صرفه‌جویی در انرژی، منابع و انتشار و کاهش تأثیرات محیط‌زیستی استفاده از مواد استفاده می‌شود. اگرچه کاهش و استفاده مجدد گزینه‌های "سبزتر" هستند [۱۱]، اما استفاده از مواد بازیافت‌شده به جای مواد اولیه نیز به عنوان راه‌حل مفید شناخته می‌شود. با این حال، فقط برخی از انواع مواد می‌توانند به طور مکرر بازیافت و یا استفاده مجدد شوند (مانند فلزات، شیشه) [۱۲]. بنابراین، بازیافت ضایعات TP ضروری است تا تأثیرات محیط‌زیستی ناشی از تولید ضایعات از صنعت بسته‌بندی کاهش یابد [۱۳].

فناوری‌های بازیافت Tetra Pak را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد: فرایندهایی که از کارتن Tetra Pak به همان شکل استفاده می‌کنند و فرایندهایی که قبل از بازیافت مواد باقی‌مانده، مرحله تهیه خمیر کاغذ را انجام می‌دهند [۳]. از آن‌جا که مقوا ۷۵ درصد از وزن کل کارتن‌های آسپتیک را تشکیل می‌دهد، هدف اصلی روش بازیافت بر این بخش متمرکز است. بازیافت در یک کارخانه بازیابی الیاف کاغذی با استفاده از یک هیدروپالپر انجام می‌شود. هیدروپالپرها مخازن استوانه‌ای بزرگی هستند که الیاف کاغذ را جدا کرده و خمیر نسبتاً نازکی تولید می‌کنند. تماس بین آب و لایه‌ها در هیدروپالپر رخ می‌دهد و لایه‌ها به دلیل نیروهای هیدرولیکی جدا می‌شوند. در این فرآیند هیچ ماده شیمیایی استفاده نمی‌شود [۱۴]. یک کارتن آسپتیک با غلظت ۳ درصد (۳۰ کیلوگرم کارتن در ۹۷۰ کیلوگرم آب) تا ۱۵ درصد (۱۵۰ کیلوگرم کارتن در ۸۵۰ کیلوگرم آب) به وزن، مخلوط و به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه همزده می‌شود [۶]. هیدروپالپرها دارای یک راکر هستند که باقی‌مانده‌های آلومینیوم-پلی اتیلن (Al-PE)، درب‌ها و نی‌ها را از خمیر جدا می‌کند. در طی این فرآیند، تقریباً تمام الیاف موجود در کارتن از لایه‌های پلی‌اتیلن و آلومینیوم جدا می‌شوند. با این حال، ۲۵ درصد باقی‌مانده مواد، ناخواسته تلقی می‌شوند [۱۵]. نتایج این فرآیند شامل الیاف کاغذی و ترکیبی از آلومینیوم و پلی‌اتیلن با محتوای آلومینیوم تا ۱۵ درصد است. این فرآیند بسیار پرهزینه است و برخی تحقیقات نشان می‌دهند که سودآور بودن بازیافت ضایعات دشوار است [۱۶]. ایده‌آل آن است که پلی‌اتیلن نیز از آلومینیوم جدا شود تا تمام مواد بتوانند دوباره در کاربرد اصلی خود مورد استفاده قرار گیرند به جای این که به صورت باقی‌مانده Al-PE فروخته شوند. با این حال، چالش‌های فنی مرتبط با این کار قابل توجه هستند. فرآیند بازیافت کاغذ، همان‌طور که ابتدا توسعه یافته بود، یک باقی‌مانده مخلوط حاوی ۵ تا ۱۰ درصد وزنی کاغذ را باقی می‌گذارد که دشواری‌هایی ایجاد می‌کند [۱۷].

تاکنون، روش‌های مختلف بازیافت گزارش شده و تکنیک‌های چندین مقیاس آزمایشگاهی برای فرآوری کامپوزیت‌های Al-PE توسعه یافته است. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته مکانیکی، شیمیایی و گرمایی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های شیمیایی شامل حل‌شدن LDPE، حذف آلومینیوم و تبخیر حلال یا افزودن ضدحلال برای بازیابی پلی‌اتیلن است [۱۴]. جداسازی با حلال‌ها توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۱۸، ۱۹]. آب فوق‌بهرانی، اسیدهای معدنی و حلال‌های آلی مانند اسید هیدروکلریک، سدیم هیدروکسید، اسید نیتریک، اسید فرمیک، اسید استیک، مؤلفه‌های تک‌جزئی مانند بنزن و استون و حلال‌های مختلط مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۰]. روش شیمیایی بر دو تکنیک کلی تمرکز دارد: انحلال و جداسازی. اگرچه تکنیک انحلال می‌تواند بهبود یابد، اما تحقیقات در این زمینه محدود هستند [۲۱]. در یک مطالعه [۲۲] که از سیزده حلال مختلف استفاده شد، حل‌شدن پلی‌اتیلن بررسی و سپس حذف کاغذ با استفاده از فناوری هیدروپالپینگ انجام شد. بهترین کارایی در انحلال پلی‌اتیلن با حلال‌های تری‌کلرواتیلن، زایلن، بنزن و تولوئن به‌دست آمد. مشاهده شد که هنگام کار در نقاط جوش تری‌کلرواتیلن، زایلن و تولوئن انحلال کامل در حدود ۴ دقیقه انجام می‌شود و دما نقش حیاتی در فرآیند جداسازی ایفا می‌کند. در مطالعه دیگری [۲۳] از پنتان، هگزان و اکتان برای حل‌کردن LDPE استفاده شد. مخلوطی از قطعات TP در دمای ۱۹۵

درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه فرآوری شد. مخلوط از طریق یک کیف بوخنر بر آب سرد ریخته شد و پلی اتیلن در سطح آب رسوب کرد. مشاهده شد که پلی اتیلن استخراج شده خالص نبوده و مقدار رنگ مستقل از حلال در آن وجود داشت. بهترین حلال برای انحلال پلی اتیلن، اکتان بود که ۹۹/۵ درصد پلی اتیلن موجود در کارتن را حل می کرد. آنالیز FTIR نشان داد که مقدار کمی پلی اتیلن همچنان روی کاغذ و آلومینیوم باقی مانده است. در مطالعه ای دیگر [۲۴]، محققان از کلروفرم به عنوان حلال برای حل کردن پلی اتیلن استفاده کردند. فیلم های TP در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۲۰ دقیقه پردازش شدند. در نتیجه این فرآیند، کاغذ و آلومینیوم باقی ماندند و پلی اتیلن در کلروفرم حل شده و به واحد تقطیر انتقال یافت تا پس از تبخیر حلال، پلی اتیلن جامد به دست آید. سپس آب به آلومینیوم و کاغذ اضافه شد تا کاغذ به خمیر تبدیل شود. در مطالعه دیگری [۲۵] از زایلن برای جداسازی آلومینیوم از پلی اتیلن استفاده شد. مخلوطی از کامپوزیت های Al-PE (۱/۵ گرم) و حلال مربوطه (۲۰۰ میلی لیتر) در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۶۰ دقیقه هم زده شدند. با این روش، ۵۶ درصد پلی اتیلن بازیابی شد. بازیافت پایین تر در مقایسه با مطالعه دیگر [۲۲] نشان می دهد که کامپوزیت های حاصل از هیدروپالپینگ با بسته بندی های پردازش نشده متفاوت هستند.

هدف این مطالعه توسعه روشی حلقه بسته برای بازیافت بسته بندی های آسپتیک بدون هیدروپالپینگ است تا پلی اتیلن، کاغذ و آلومینیوم به صورت خالص و قابل استفاده مجدد بازیابی شوند. این پژوهش به دلیل محدودیت های روش های موجود، مانند کارایی پایین هیدروپالپینگ، استفاده از حلال های گران یا خطرناک، بررسی ناکافی پارامترهای انحلال و کمبود روش های مؤثر برای جداسازی آلومینیوم از کاغذ انجام شد. اهداف اصلی شامل بازیابی کامل پلی اتیلن با خلوص بالا، حفظ کاغذ و آلومینیوم، و بررسی دلایل انحلال ضعیف پلی اتیلن در کامپوزیت های Al-PE است. این روش با بهینه سازی انحلال و حذف هیدروپالپینگ به مدیریت پایدار پسماند و اقتصاد چرخشی کمک می کند.

نوآوری این پژوهش در توسعه یک روش بازیافت حلقه بسته نهفته است که با حذف مرحله هیدروپالپینگ، که معمولاً به پلی اتیلن آسیب می رساند و کیفیت بازیافت را کاهش می دهد، به بازیابی کامل و خالص هر سه جزء اصلی (پلی اتیلن، کاغذ و آلومینیوم) می پردازد. برخلاف روش های متداول که عمدتاً بر بازیافت کاغذ تمرکز دارند و اغلب منجر به تولید ضایعات مخلوط آلومینیوم-پلی اتیلن (Al-PE) با خلوص پایین می شوند، این مطالعه از یک مخلوط حلال بهینه شده (بنزین:زایلن:تولون) استفاده می کند که انحلال کامل LDPE را تضمین می کند و در عین حال کاغذ و آلومینیوم را دست نخورده نگه می دارد. این روش با استفاده از جداساز جریان گردابی (ECS) برای جداسازی مؤثر آلومینیوم از کاغذ، نیاز به فرآیندهای پرهزینه و انرژی بر مانند هیدروپالپینگ را حذف می کند و کارایی بازیافت را بهبود می بخشد.

علاوه بر این، این پژوهش با بررسی دقیق پارامترهای انحلال از طریق طراحی آزمایش Plackett-Burman، محدودیت های روش های پیشین مانند استفاده از حلال های گران قیمت یا خطرناک و کارایی پایین در جداسازی اجزا را برطرف کرده است. این رویکرد نه تنها امکان بازیافت LDPE با خلوص بالا را فراهم می کند، بلکه با کاهش مصرف آب و انرژی در مقایسه با روش های سنتی، به پایداری محیط زیستی کمک می کند. این نوآوری گامی مهم در جهت تحقق اقتصاد چرخشی است، زیرا امکان استفاده مجدد مستقیم از هر سه جزء را فراهم می آورد و وابستگی به مواد اولیه را کاهش می دهد، در حالی که چالش های فنی مرتبط با بازیافت کامپوزیت های چندلایه را به حداقل می رساند.

۲. روش تحقیق

۲.۱. مواد اولیه

ضایعات کارتن‌های آسپتیک از برندهای داخلی (Alvand pack and Sun pack) و برندهای خارجی (Tetra Pak and SIG) جمع آوری شدند تا در مطالعه مورد استفاده قرار گیرند. قسمت‌های اضافی مانند درپوش‌ها و نی‌ها برداشته شدند و کارتن‌ها شسته و خشک گردیدند. فرآیند انحلال با استفاده از حلال‌های روبرو انجام شد: زایلن ۹۹٪ با نقطه جوش ۱۴۰ درجه سلسیوس، تولید شده توسط پتروشیمی اصفهان؛ تولوئن ۹۹٪ با نقطه جوش ۱۱۰ درجه سلسیوس، نیز تولید شده توسط پتروشیمی اصفهان؛ و بنزین معمولی با محدوده جوش ۳۸-۲۰۴ درجه سلسیوس [۲۶-۲۸]، تولید شده توسط شرکت پالایش و پخش فراورده‌های نفتی ایران. این حلال‌ها برای انحلال و بازیابی LDPE که دامنه تجزیه آن ۲۸۰ تا ۳۶۰ درجه سلسیوس است [۲۹-۳۱]، در واحد تقطیر انتخاب شدند.

۲.۲. فرایند انحلال

فرایند انحلال LDPE در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، هدف تعیین درصد‌های حجمی بهینه برای حلال‌های انتخاب‌شده (زایلن، تولوئن و بنزین) بود تا کارایی انحلال پلی‌اتیلن به حداکثر برسد. این مرحله بر اساس مطالعات پیشین که نشان‌دهنده کارایی بالای حلال‌های آروماتیک مانند زایلن و تولوئن در انحلال پلی‌اتیلن بودند، طراحی شد [۲۲، ۲۵]. در مرحله دوم، پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر فرایند انحلال شناسایی شدند تا شرایط بهینه برای دستیابی به انحلال کامل LDPE تعیین گردد.

۲.۲.۱. فرایند اول

قطعات TP با ابعاد ۱/۵ سانتی‌متر بر ۱/۵ سانتی‌متر وزن شدند (وزن ۱). سپس در ارلن‌مایر حاوی ۵۰ میلی‌لیتر حلال به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سلسیوس با سرعت هم‌زدن ۲۰۰ دور در دقیقه پردازش گشتند. یک کندانسور به ارلن‌مایر متصل بود که در یک حمام روغن قرار داشت. پس از پردازش، قطعات جامد باقی‌مانده با استفاده از الک شماره ۳۰ از حلال فیلتر شدند. این قطعات جامد با آب شستشو و در آن در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند، قبل از این‌که وزن‌گیری شوند (وزن ۲). درصد تغییر و درصد انحلال پلی‌اتیلن با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند:

$$\text{Percent change (\%)} = \frac{(\text{weight1} - \text{weight 2})}{\text{weight1}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Percent dissolution (\%)} = \frac{\text{Percent change}}{\text{Net weight percent of polyethylene}} \times 100 \quad (2)$$

۲.۲.۲. فرایند دوم

پس از یافتن درصد حجمی بهینه برای هر یک از حلال‌های مورد نظر، از طراحی آزمایش برای شناسایی پارامترهای تأثیرگذار استفاده شد. در نتیجه، قطعات TP دوباره با مخلوطی از حلال‌های بنزین:زایلن:تولوئن (۵۰:۲۵:۲۵) حجم/حجم طبق طرح توسعه یافته با استفاده از نرم‌افزار Minitab 21 پردازش شدند. درصد انحلال LDPE با محاسبه کاهش وزن و تفاوت در مقدار نمونه قبل و بعد از پردازش براساس معادلات (۱) و (۲) به دست آمد.

۲.۳. فرایند تقطیر

پس از پردازش در شرایط انتخاب شده و فیلترکردن از کاغذ و آلومینیوم باقی‌مانده، حلال و پلی‌اتیلن حل‌شده در آن به واحد تقطیر منتقل شدند. فرایند تقطیر با در نظر گرفتن نقاط جوش حلال‌ها و LDPE انجام شد. ارلن‌مایر در حمام روغن قرار داده شد، اتصالات عایق‌بندی شدند و کندانسور به جریان آب سرد متصل گشت (شکل ۲). محلول در واحد تقطیر تا ۲۱۰ درجه سلسیوس گرم شد و به مدت ۲۰ دقیقه در این دما نگه داشته شد تا تبخیر کامل سه حلال انجام شود. در این عملیات، پارامترهای فرایند تقطیر به دقت کنترل شدند تا حذف کامل حلال‌ها و جلوگیری از تجزیه حرارتی پلیمر حاصل شود. بنابراین بخارهای حلال در کندانسور چگالیده و جمع‌آوری شدند و پلی‌اتیلن خالص جامد در ارلن‌مایر باقی‌ماند. پلی‌اتیلن باقی‌مانده در ارلن‌مایر محصول نهایی بازیافت شده بود که سپس مورد تحلیل قرار گرفت [۳۲].



شکل ۲. واحد تقطیر جهت بازیابی پلی‌اتیلن از حلال.

Figure 2. Distillation unit for recovering polyethylene from solvent.

۲.۴. درصد وزنی خالص LDPE در برندهای مختلف بسته‌بندی آسپتیک

برای محاسبه درصد انحلال به روش کاهش وزن، لازم است درصد وزنی خالص پلی‌اتیلن به دقت تعیین شود [۴]. در مراجع، این درصد برای برند تتراپک ۲۵٪ گزارش شده است [۴، ۳۳]. با این حال، با توجه به احتمال تفاوت در بازده درصد انحلال و

درصد وزنی پلی اتیلن خالص در برندهای مختلف، روشی برای محاسبه آن پیشنهاد شد. بدین منظور، براساس روشی که توسط گروه ما توسعه یافته است، نمونه‌ها پس از پیش‌پردازش با اسید فرمیک برای جداسازی پلی اتیلن از سایر اجزا، در محلول اسید سولفوریک شسته شدند تا ناخالصی‌ها حذف و پلی اتیلن باقی‌مانده نگه داشته شود. سپس، وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و درصد تغییر نسبت به وزن اولیه محاسبه گردید. این فرایند برای هر برند دو بار تکرار شد و میانگین درصد وزن پلی اتیلن خالص محاسبه شد (جدول ۱). با توجه به تفاوت جزئی در درصدها برای برندهای مختلف، همه آزمایش‌های بهینه‌سازی فقط با برند تتراپک انجام شد تا خطا به حداقل برسد.

جدول ۱. محاسبه درصد وزنی خالص پلی اتیلن در برندهای مختلف بسته‌بندی.

Table 1. Pure weight percentage of LDPE in various aseptic packaging brands.

برند	قبل از اسیدشویی (g)	بعد از اسیدشویی (g)	درجه تغییر (%)	وزن خالص پلی اتیلن (%)
Tetra Pak	۱/۰۵۰۲	۰/۲۵۹۰	۷۵/۳	۲۵
SIG	۱/۰۴۸۰	۰/۲۵۲۶	۷۵/۹	۲۴
Alvand pack	۱/۰۳۷۲	۰/۲۴۷۴	۷۶/۱	۲۴
Sun pack	۱/۰۲۴۷	۰/۲۱۱۲	۷۹/۴	۲۱

۲.۵. طراحی آزمایش

عوامل بالقوه تأثیرگذار با استفاده از مدل Plackett-Burman با ۱۲ اجرا شناسایی شدند. از نرم‌افزار Minitab نسخه ۲۱ برای فرایند غربال‌گری استفاده شد [۳۴]. نسبت S/L (گرم بر میلی لیتر)، اندازه قطعات (سانتی متر × سانتی متر)، دما (درجه سلسیوس)، زمان (دقیقه)، سرعت همزن (دور در دقیقه) و درزهای دولایه (بله/خیر) به عنوان متغیرهای مستقل و درصد انحلال (٪) به عنوان متغیر وابسته انتخاب شدند. پس از انجام آزمایش‌ها، از همان نرم‌افزار برای تحلیل داده‌ها استفاده شد. در این مطالعه، علاوه بر سایر پارامترها، پارامتر بدون واحد درزهای دولایه نیز در نظر گرفته شد. درزهای دولایه به نقاط اتصال دو صفحه لمینت اشاره دارد. شرکت‌ها این درزها را با چسب آب‌بند می‌کنند تا محتویات را در کارتن‌ها نگه دارند. در این مطالعه، این درزها به طور جداگانه جمع‌آوری شدند تا تأثیر آن‌ها بر فرایند انحلال بررسی شود. سپس، آزمایش‌ها براساس خروجی نرم‌افزار انجام شدند [۳۵].

۲.۶. آنالیز FTIR

از طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR) برای بررسی ساختار شیمیایی نمونه LDPE بازیافت‌شده استفاده شد. طیف‌های FTIR با استفاده از دستگاه طیف‌سنج Bruker Tensor 27 مجهز به لوازم بازتاب کل داخلی تضعیف‌شده (ATR) پلاتینی جمع‌آوری شدند. طیف‌ها در محدوده عدد موج ۴۰۰۰ تا ۶۰۰ cm^{-1} با رزولوشن ۴ cm^{-1} اندازه‌گیری شدند. پیک‌های جذبی مشخصه LDPE در طیف نمونه، با مقایسه با طیف مرجع LDPE شناسایی گردیدند [۳۶].

۳. یافته‌ها

۳.۱. انتخاب نسبت بهینه زایلن، تولوئن و بنزین

به منظور بهینه‌سازی انحلال پلی‌اتیلن در قطعات TP، سری آزمایش‌هایی در نسبت‌های مختلف زایلن، تولوئن و بنزین انجام گرفت (جدول ۲). این آزمایش‌ها در سه مرحله صورت پذیرفت. در مرحله نخست، توانایی هر حلال به صورت جداگانه بررسی شد. در این مرحله، توانایی زایلن و تولوئن تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند، اما همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، بنزین توانایی کمتری در انحلال LDPE از خود نشان داد. هنگام استفاده از زایلن و تولوئن، لایه‌های آلومینیومی و کاغذی از هم جدا شدند. با این حال، چسبندگی‌ای میان قطعات مشاهده گردید که حاکی از انحلال ناقص پلی‌اتیلن بود. همچنین در این حالت، کاغذ شکل اولیه خود را حفظ کرده بود. این مشاهدات هنگام بهره‌گیری از بنزین کمی متفاوت بود، چراکه پلی‌اتیلن میان لایه‌ها حل نشده بود و در نتیجه، بیشتر قطعات آلومینیومی و کاغذی به یکدیگر چسبیده باقی مانده بودند.

در مرحله دوم، اثر افزودن زایلن و تولوئن به بنزین مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، بر پایه اجراهای ۴ و ۵، بنزین به تنهایی با ۵۰ درصد حجمی زایلن و تولوئن آزمایش شد. نتایج نشان داد که این امر می‌تواند انحلال LDPE را حدود ۱۵ درصد افزایش دهد. به منظور بررسی اثر متقابل میان زایلن و تولوئن، آزمایش ۶ انجام پذیرفت. بنابراین، نتایج حاکی از آن بود که حلال‌ها بر یکدیگر اثر متقابل دارند و ترکیب آن‌ها همواره انحلال را افزایش می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده، در مرحله سوم از سه حلال به صورت مخلوط استفاده گردید. این آزمایش‌ها با هدف حداکثرسازی استفاده از بنزین انجام شدند. پس از اجرای آزمایش‌ها، مشاهده شد چسبندگی قطعات در اجراهای ۷ و ۸ به میزان قابل توجهی کاهش یافته و آلومینیوم و کاغذ به طور کامل از یکدیگر جدا شده‌اند. در این دو آزمایش، درصد انحلال LDPE تقریباً برابر بود، اما با افزایش درصد حجمی بنزین به ۷۰ درصد، کاهش قابل ملاحظه‌ای در انحلال مشاهده گردید. از این رو، با در نظر گرفتن درصد انحلال برابر در آزمایش ۷ و کاهش آن در آزمایش ۱۰، این نسبت‌ها کنار گذاشته شدند و آزمایش‌های تکمیلی برای بررسی بیشتر اجراهای ۸ و ۹ صورت پذیرفت. با توجه به متغیر بودن درصد انحلال بنزین، سه نمونه از بنزین معمولی که در بازه‌های زمانی مختلف از پمپ‌بنزین‌های متفاوت جمع‌آوری شده بود، برای تعیین نسبت بهینه آزمایش شدند. در این حالت، درصد انحلال LDPE بین ۷۹ تا ۸۶ درصد متغیر بود. به همین دلیل، نسبت حجمی ۵۰ درصد برای بنزین انتخاب گردید تا درصد انحلال LDPE انعطاف‌پذیر باشد. سرانجام، برای اطمینان از اثر مثبت بنزین، آزمایش دیگری با اتانول به عنوان حلال جایگزین در نسبت انتخاب شده انجام گرفت. بر اساس این آزمایش، درصد انحلال به ۲۲ درصد کاهش یافت. در نتیجه ثابت شد که در فرآیند انحلال، زایلن و تولوئن مستقل از بنزین عمل نمی‌کنند.

بنابراین، ترکیب زایلن، تولوئن و بنزین با نسبت ۲۵:۲۵:۵۰ به عنوان فرمولاسیون بهینه برای انحلال پلی‌اتیلن شناسایی شد. سپس با غربال‌گری پارامترهای مهم، شرایطی فراهم آمد تا انحلال کامل پلی‌اتیلن محقق گردد.

جدول ۲. بهینه‌سازی انحلال LDPE: آزمایش نسبت‌های مختلف زایلن، تولوئن و بنزین.

اجرا	زایلن (%)	تولوئن (%)	بنزین (%)	قبل از پردازش (gT)	بعد از پردازش (gT)	درصد تغییر	درصد انحلال
۱	۱۰۰	۰	۰	۱/۰۲۶۱	۰/۷۸۴۳	۲۳/۶	۹۴
۲	۰	۱۰۰	۰	۱/۰۳۴۶	۰/۷۹۳۰	۲۳/۴	۹۳
۳	۰	۰	۱۰۰	۱/۰۴۷۹	۰/۸۳۵۲	۲۰/۳	۸۱
۴	۵۰	۰	۵۰	۱/۰۴۱۲	۰/۷۹۰۹	۲۴/۰	۹۶
۵	۰	۵۰	۵۰	۱/۰۴۳۲	۰/۷۹۰۵	۲۴/۲	۹۷
۶	۵۰	۵۰	۰	۱/۰۳۰۳	۰/۷۸۰۴	۲۴/۳	۹۷

۷	۳۰	۳۰	۴۰	۱/۰۴۴۰	۰/۷۸۷۶	۲۴/۶	۹۸
۸	۲۵	۲۵	۵۰	۱/۰۲۶۸	۰/۷۷۵۸	۲۴/۴	۹۸
۹	۲۰	۲۰	۶۰	۱/۰۳۱۶	۰/۷۸۵۱	۲۳/۹	۹۶
۱۰	۱۵	۱۵	۷۰	۱/۰۳۸۶	۰/۷۹۹۸	۲۳/۰	۹۲

۳.۲. شناسایی پارامترهای تأثیرگذار

برای دستیابی به انحلال کامل پلی اتیلن، اثر شش عامل در دو سطح طی دوازده آزمایش بررسی شد (جدول ۳). نتایج نشان داد نرخ انحلال در نیمی از آزمایش‌ها بالای ۹۰٪ است. هنگامی که انحلال بسیار بالا نبود (مانند اجرا ۱۱)، مشاهده شد محلول کاملاً لزج است، پلی اتیلن در باقی مانده وجود دارد و برخی قطعات اصلاً جدا نشده‌اند. در آزمایشی با انحلال ۱۰۰٪ (اجرا ۵)، هیچ پلی اتیلنی در باقی مانده وجود نداشت و قطعات پس از خارج شدن از آون به هم نچسبیده بودند. شرایط در اجرا ۱ مطابق شرایط عادی بود و تنها از قطعات دولایه به عنوان مواد استفاده شد. در این حالت، مشکلی در پردازش وجود نداشت، اما پلی اتیلن در باقی مانده دیده شد. همچنین در اجرا ۸، زمان و سرعت همزن کاهش یافت و به نظر رسید برخی لایه‌ها کمی چسبناک شده بودند. در مجموع، هر پارامتر ویژگی‌های منحصر به فردی در پردازش و نتایج ایجاد می‌کرد. گاهی این اثرات حتی بیشتر برجسته بودند؛ برای مثال، زمانی که نسبت جامد به مایع افزایش یافت، پردازش دچار مشکل شد و پلی اتیلن باقی ماند. این مشاهدات تقریباً مشابه زمانی بود که از قطعات دولایه نیز استفاده می‌شد. ولیکن این یافته‌ها براساس مشاهدات بود و استنباط از درصد انحلال چندان معنادار نبود. بنابراین، از طراحی آزمایش برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در مرحله بعد استفاده شد.

پس از انتخاب درصد انحلال به عنوان متغیر وابسته، آزمایش غربال‌گری انجام شد. در این مرحله، سطح اطمینان ۹۰٪ در نظر گرفته شد و در نتیجه آلفا برابر ۰/۱ تنظیم گردید. دلیل این کار، جبران اثر کمتر پارامتر دما به دلیل محدوده محدود آن بود. سایر تنظیمات در حالت پیش فرض باقی ماند و آنالیز واریانس انجام شد. سپس، نمودار پارتو چهار پارامتر را به عنوان تأثیرگذار بر انحلال پلی اتیلن شناسایی کرد. دو پارامتر بسیار تأثیرگذار، نسبت جامد به مایع و درزهای دولایه بودند. به نظر می‌رسد هرچه نسبت جامد به مایع بیشتر باشد، غلظت پلی اتیلن در محلول بیشتر و در نتیجه درصد انحلال کمتر می‌شود. این بدان دلیل است که افزایش غلظت پلی اتیلن، منجر به افزایش گرانروی محلول و کاهش نفوذپذیری حلال می‌گردد. همچنین ثابت شد وجود درزهای دولایه، سطح تماس پلی اتیلن با حلال را کاهش می‌دهد و درصد انحلال را پایین می‌آورد.

از نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر نسبت جامد به مایع احتمالاً یکی از دلایل درصد انحلال پایین‌تر در کامپوزیت‌های Al-PE در مقایسه با نمونه‌های TP است. از آن‌جا که کامپوزیت‌های Al-PE پلی اتیلن بیشتری در واحد حجم دارند، کارایی حلال‌ها در انحلال آن‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، پارامتر درزهای دولایه احتمالاً یکی دیگر از دلایل درصد انحلال پایین‌تر و متغیرتر در کامپوزیت‌های Al-PE است؛ زیرا برخی از این درزها حتی پس از فرآیند هیدروپالینگ باقی می‌مانند و در فرآیند انحلال مشکل ایجاد می‌کنند.

جدول ۳. تأثیر پارامترهای فرایند بر انحلال LDPE.

Table 3. The effect of process parameters on LDPE dissolution.

اجرا	نسبت جامد به مایع (گرم بر میلی لیتر)	سایز (سانتی متر)	دما (درجه سلسیوس)	زمان (دقیقه)	سرعت همزن (دور در دقیقه)	قطعات دولایه	قبل از پردازش	بعد از پردازش	درصد انحلال
------	---	---------------------	----------------------	-----------------	-----------------------------	-----------------	------------------	------------------	----------------

۹۵	۰/۷۸۰۶	۱/۰۲۳۱	بله	۲۰۰	۱۵	۹۰	۱/۵	۰/۰۲	۱
۸۵	۴/۰۱۴۶	۵/۰۹۷۸	بله	۲۰۰	۵	۱۲۰	۲/۵	۰/۱	۲
۸۹	۳/۹۵۷۲	۵/۰۹۷۵	خیر	۰	۱۵	۹۰	۲/۵	۰/۱	۳
۹۴	۰/۹۷۲۱	۱/۲۷۱۲	بله	۰	۱۵	۱۲۰	۲/۵	۰/۰۲	۴
۱۰۰	۰/۷۸۲۷	۱/۰۴۴۱	خیر	۲۰۰	۱۵	۱۲۰	۱/۵	۰/۰۲	۵
۸۷	۳/۹۲۹۱	۵/۰۱۵۴	خیر	۰	۵	۱۲۰	۱/۵	۰/۱	۶
۸۸	۰/۸۳۸۲	۱/۰۷۵۶	بله	۰	۵	۹۰	۲/۵	۰/۰۲	۷
۹۶	۰/۷۷۴۱	۱/۰۱۸۵	خیر	۰	۵	۹۰	۱/۵	۰/۰۲	۸
۹۱	۳/۹۰۶۵	۵/۰۴۹۵	بله	۰	۱۵	۱۲۰	۱/۵	۰/۱	۹
۹۹	۰/۸۷۱۹	۱/۱۵۹۱	خیر	۲۰۰	۵	۱۲۰	۲/۵	۰/۰۲	۱۰
۸۰	۴/۰۵۷۸	۵/۰۷۹۲	بله	۲۰۰	۵	۹۰	۱/۵	۰/۱	۱۱
۸۹	۴/۰۲۶۴	۵/۱۷۸۵	خیر	۲۰۰	۱۵	۹۰	۲/۵	۰/۱	۱۲

۳,۳. بهینه‌سازی درصد انحلال پلی‌اتیلن در برندهای مختلف بسته‌بندی آسپتیک

با شناسایی پارامترهای موثر، مطالعات بیشتری روی برندهای مختلف بسته‌بندی آسپتیک انجام شد. درصد انحلال پلی‌اتیلن در برندهای انتخاب شده بر اساس درصد وزنی خالص پلی‌اتیلن آن‌ها محاسبه شد (جدول ۴). تحت شرایط عملیاتی نرمال و با استفاده از نسبت بهینه بنزین:زایلن:تولوئن (۵۰:۲۵:۲۵) حجم/حجم، بالاترین درصد انحلال ثبت شده برای برند تتراپک ۹۸٪ بود. برای بررسی تأثیر پارامترها بر درصد انحلال تتراپک و سایر برندها، پارامتر دما از ۹۰ درجه سلسیوس به ۱۲۰ درجه سلسیوس افزایش یافت. با افزایش دما، انحلال پلی‌اتیلن برای تمام برندها به صد درصد رسید، به جز برند الوندپک که ۸۱٪ بود. برای دستیابی به انحلال کامل این برند، علاوه بر افزایش دما، پارامتر زمان نیز از ۱۵ دقیقه به ۳۰ دقیقه افزایش داده شد. بنابراین، این برند نیز به انحلال کامل دست یافت. به عبارت دیگر، در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و پردازش با حلال بنزین:زایلن:تولوئن (۵۰:۲۵:۲۵) حجم/حجم به مدت ۳۰ دقیقه، انحلال کامل پلی‌اتیلن بسته‌بندی آسپتیک، صرف نظر از برند آن‌ها حاصل شد.

نرخ‌های انحلال پلی‌اتیلن متفاوت برای برندهای متفرقه این چینی می‌تواند ناشی از عواملی هم‌چون وزن مولکولی، درجه بلورینگی، افزودنی‌ها و ناخالصی‌های موجود در پلی‌اتیلن باشد که به فرآیند تولید و خلوص محصول بستگی دارد. از آن‌جا که اطلاعات کافی درباره فرآیندهای تولید و ترکیبات مورد استفاده در این شرکت‌ها در دسترس نیست، بیان دلایل دقیق تفاوت در نرخ‌های انحلال دشوار است.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد تفاوت‌های ساختاری در برندهای مختلف ظروف نوشیدنی آسپتیک نیز می‌تواند یکی از علل کاهش درصد انحلال پلی‌اتیلن در کامپوزیت‌های AI-PE باشد؛ زیرا امکان دارد این کامپوزیت‌ها شامل مخلوطی از ده‌ها برند با ساختارهای متفاوت باشند.

جدول ۴. درصد انحلال پلی‌اتیلن در برندهای مختلف بسته‌بندی آسپتیک.

Table 4. Percentage of polyethylene dissolution in different brands of aseptic packaging.

برند	قبل از پردازش (gF)	بعد از پردازش (gF)	درصد تغییر	درصد انحلال
Tetra Pak	۱/۰۹۱۲	۰/۸۱۸۹	۲۵/۰	۱۰۰
SIG	۱/۰۳۵۱	۰/۷۸۶۹	۲۴/۰	۱۰۰
Alvand pack	۱/۰۷۶۳	۰/۸۶۶۴	۱۹/۵	۸۱

۳،۴. بازیافت قطعات TP و ارزیابی درصد بازیابی و خلوص محصول

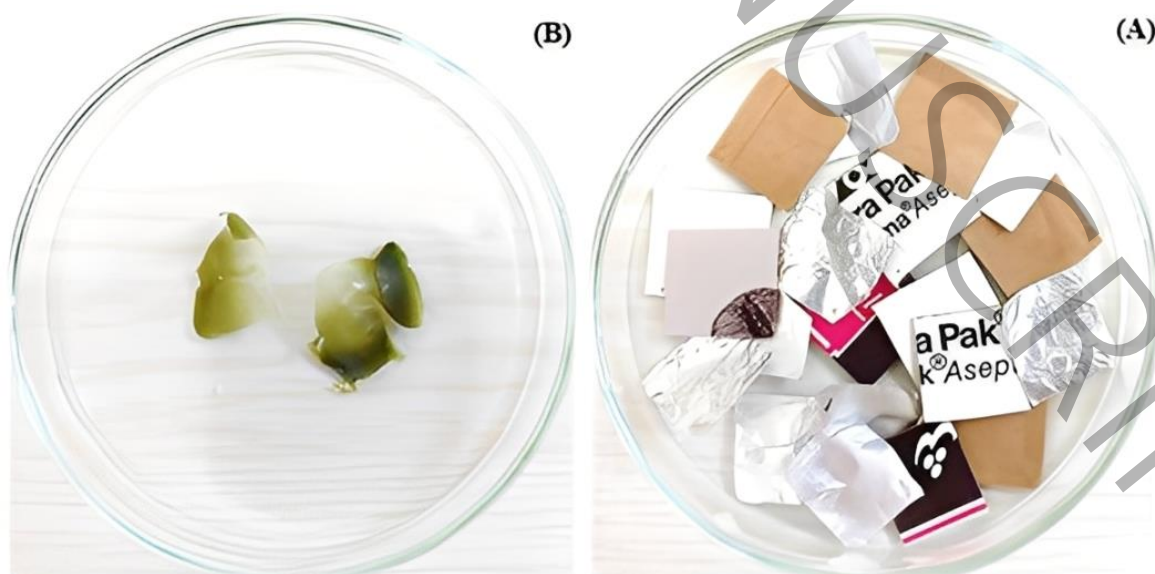
به منظور بررسی درصد بازیافت و میزان خلوص، قطعات TP تحت شرایط بهینه مجدداً پردازش شدند. در این شرایط، پس از جداسازی باقی مانده، حلال و پلی اتیلن حل شده به واحد تقطیر منتقل و بازیافت گردیدند (جدول ۵). نتایج حاصله نشان می دهد که پلی اتیلن ۱۰۰٪ بازیابی شده و حلال ۱۰٪ تلفات داشته است. به نظر می رسد این تلفات ناشی از انتقال ظرف، نشستی ستاپ و تبخیر بنزین بوده باشد. مهم تر از همه، مشخص گردید که پلی اتیلن بازیافتی دارای رنگ سبز کم رنگی است که گویا از افزودنی های رنگی موجود در بنزین نشأت می گیرد. این امر به این دلیل است که حلال بازیافت شده کاملاً بی رنگ است. به عبارت دیگر، رنگ از بنزین به محصول پلی اتیلن منتقل می گردد. شاید این موضوع به این علت باشد که نقطه جوش رنگدانه های رنگی آن قدر بالا است که همراه با حلال ها تبخیر نمی شود، بنابراین رنگدانه در کنار پلی اتیلن بازیافتی باقی می ماند.

به منظور تأیید درجه خلوص کاغذ و آلومینیوم بازیافتی، باقی مانده در یک محلول اسید سولفوریک ریخته شد تا حل گردد. از آن جایی که محلول فیلتر شده باقی مانده هیچ پلی اتیلن یا ماده دیگری را در بر نداشت، می توان نتیجه گرفت که کاغذ و آلومینیوم فاقد هرگونه ناخالصی پلاستیکی بودند. بنابراین، قطعات TP به دو جزء بازیافت گردیدند: LDPE و باقی مانده کاغذ/آلومینیوم (شکل ۳).

جدول ۵. میزان بازیابی حلال و پلی اتیلن پس از فرآیند تقطیر.

Table 5. The recovery rate of solvent and polyethylene after the distillation process.

محلول	قبل از عملیات	بعد از عملیات	درصد بازیابی
حلال	۵۰ (میلی لیتر)	۴۵ (میلی لیتر)	۹۰
پلی اتیلن	۰/۲۵۶۵ (گرم)	۰/۲۵۵۴ (گرم)	۱۰۰



شکل ۳. فرایند بازیافت کارتن‌های آسپتیک: (A) کاغذ و آلومینیوم؛ (B) پلی‌اتیلن که رنگ سبز بنزین را جذب کرده است.

Figure 3. Aseptic carton recycling process: (A) paper and aluminum; (B) polyethylene that has absorbed the green dye from gasoline.

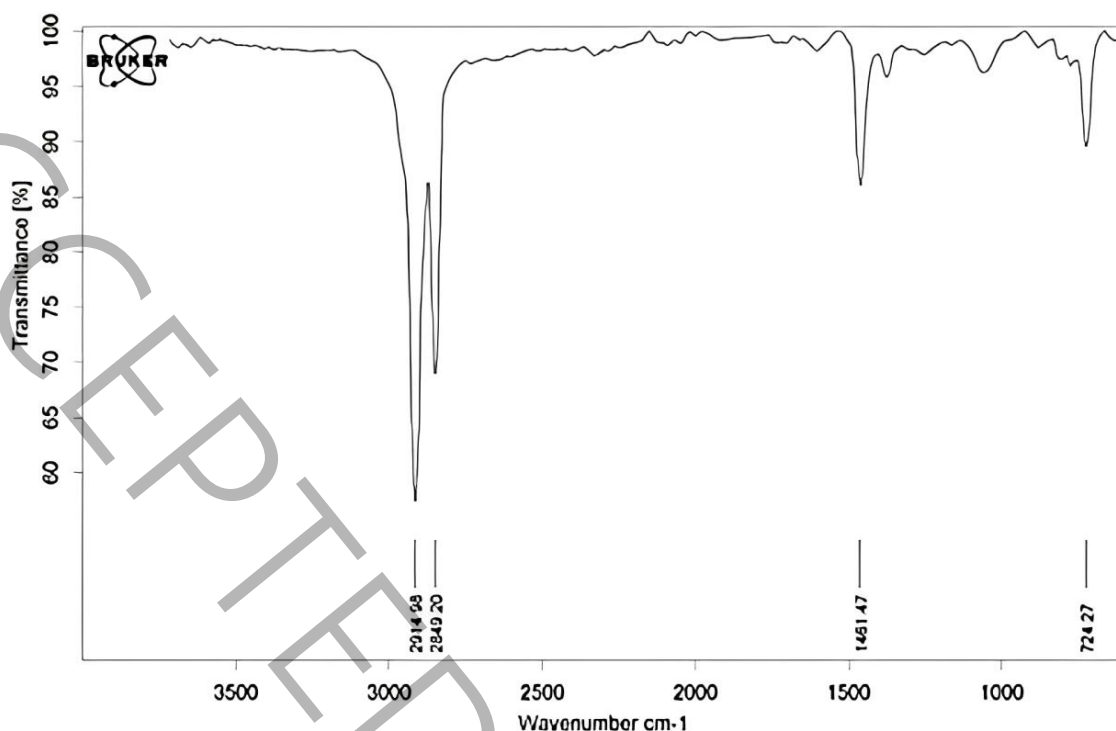
۳,۵. آنالیز FTIR

از طیف سنج FTIR برای بررسی ساختار شیمیایی و خلوص نمونه LDPE بازیافت شده پس از فرآیند انحلال-تقطیر استفاده شد. طیف FTIR مربوط به LDPE بازیافتی در شکل ۵ ارائه شده است.

طیف LDPE بازیافتی تمامی نوارهای جذب مشخصه مورد انتظار برای LDPE را نشان می‌دهد [۳۲, ۳۶]. نوارهای در حدود 2915 cm^{-1} و 2848 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن پیوند C-H گروه‌های متیلن (-CH₂-) هستند. نوارهای در 1463 cm^{-1} و 719 cm^{-1} به ارتعاشات خمشی پیوند C-H گروه‌های متیلن نسبت داده می‌شوند. نوارهای شدید در ناحیه $1500-1300\text{ cm}^{-1}$ با پیک‌هایی در حدود 1472 cm^{-1} و 1362 cm^{-1} ناشی از ارتعاشات خمشی و واگرایی پیوند C-H گروه‌های متیل (-CH₃) موجود در زنجیره اصلی LDPE هستند. نوارهای در محدوده $1200-1000\text{ cm}^{-1}$ مانند آن‌هایی در 1180 cm^{-1} و 1062 cm^{-1} به ارتعاشات کششی پیوند C-C نسبت داده می‌شوند.

طیف FTIR نمونه LDPE بازیافتی به طور نزدیکی با طیف مرجع مطابقت دارد، این مسئله نشان می‌دهد که فرآیند انحلال-تقطیر به طور مؤثر LDPE خالص را از مواد بسته‌بندی آسپتیک بازیافت کرده است. هیچ ناخالصی یا آلودگی قابل توجهی در نمونه LDPE بازیافتی بر اساس آنالیز FTIR تشخیص داده نشد، که خلوص و یکپارچگی شیمیایی محصول پلی‌اتیلن بازیافتی را تأیید می‌کند.

همان‌طور که ذکر شد، پس از بازیابی LDPE از طریق فرآیند تقطیر، مشاهده گشت که رنگ پلی‌اتیلن بازیافتی سبز است. این رنگ سبز احتمالاً ناشی از حضور رنگدانه‌های موجود در بنزین معمولی است که برای اهداف شناسایی، جلوگیری از قاچاق یا تمایز انواع سوخت به آن اضافه می‌شوند. این رنگدانه‌ها اغلب شامل ترکیبات آلی مانند آزو-رنگ‌ها یا آنتراکینون‌ها هستند که رنگ سبز یا زرد-سبز ایجاد می‌کنند و در فرآیند تقطیر، به دلیل جذب فیزیکی توسط پلیمر یا نزدیکی نقاط جوش، کاملاً جدا نمی‌شوند. آنالیز FTIR نشان داد که پیک‌های جذبی مشخصه LDPE (مانند 2915 cm^{-1} برای کشش C-H و 1465 cm^{-1} برای خمش CH₂) بدون تغییر باقی مانده‌اند و هیچ پیک جدیدی مرتبط با آلاینده‌های شیمیایی مشاهده نشد (شکل ۴). این رنگ سبز در چرخه‌های اول بازیافت ظاهر می‌شود، اما با بازیافت مداوم حلال غلظت رنگدانه‌ها کاهش می‌یابد و می‌تواند در چرخه‌های بعدی به حداقل برسد. در مقیاس صنعتی، برای جلوگیری از این مسئله، می‌توان از بنزین بدون رنگ (مانند بنزین سفید یا تصفیه‌شده) استفاده کرد یا مرحله تصفیه اضافی مانند استخراج با حلال‌های قطبی (مثل اتانول) یا فیلتراسیون فعال اضافه نمود تا LDPE کاملاً بی‌رنگ شود.



شکل ۴. طیف FTIR پلی اتیلن بازیافتی.
Figure 4. FTIR spectrum of recycled polyethylene.

۳.۶. بررسی مشکلات کامپوزیت Al-PE و ارائه یک راه کار

در این مطالعه، از قطعات TP به جای Al-PE استفاده شد. چراکه در مطالعه گذشته [۳۷] و مقالات مرتبط [۲۵، ۲۲]، به نظر رسید مخلوط کامپوزیت Al-PE دارای برخی مشکلات است که کیفیت خروجی را کاهش می دهد. بر پایه مطالعه قبلی، کامپوزیت های Al-PE حدود ۴ درصد حجمی باقی مانده کاغذ داشتند. علت این امر آن بود که کاغذ در فرآیند هیدروپالپینگ به خمیر کاغذ تبدیل می شد و به کامپوزیت های Al-PE می چسبید؛ بنابراین، این کامپوزیت ها حتی پس از فرآیند انحلال هنوز حاوی کاغذ بودند. علاوه بر این، به نظر می رسید ماهیت LDPE در این کامپوزیت ها در طول فرآیند هیدروپالپینگ تغییر می کرد. در یک مطالعه در سال ۲۰۰۵ [۳۸]، پلی اتیلن باقی مانده های Al-PE با پلی اتیلن خالص مقایسه شد. در این مطالعه، مشخص گردید که این پلیمرها در مقایسه با پلیمر خالص، دارای پایداری ترموکسیداتیو بالاتر، بلورینگی بیشتر، مقاومت ضربه ای کمتر و استحکام کششی بالاتری هستند. پس از مطالعات بر ساختار پلیمر [۳۹، ۴۰]، چندین فرضیه برای انحلال کمتر پلی اتیلن باقی مانده نسبت به پلی اتیلن خالص مطرح شد. تخریب مکانیکی در هیدروپالپینگ می تواند زنجیره های بلند پلیمر را بشکند و ترکیب هایی ایجاد کند که احتمالاً وزن مولکولی پلیمر را کاهش می دهد. از سوی دیگر، شرایط گرمایی یا اکسیداتیو در هیدروپالپینگ می تواند منجر به اکسیداسیون زنجیره های پلیمر شود که ظاهراً پیوندهای بین مولکولی را تقویت می کند و انحلال را کاهش می دهد. همچنین، آلاینده های وارد شده همراه با کارتن های مصرف شده می توانند بر پلی اتیلن باقی مانده و با مداخله در نفوذ حلال و تعامل با زنجیره های پلیمر، انحلال را محدود کنند. بنابراین، اثرات مکانیکی، گرمایی و آلودگی هیدروپالپینگ می تواند LDPE را به گونه ای تغییر دهد که ظرفیت انحلال آن در مقایسه با LDPE خالص کاهش یابد.

براساس این موضوع، برای دور زدن این مشکلات، برخی پژوهشگران فرآیند هیدروپالپینگ را که هدف از آن جداسازی

آلومینیوم از کاغذ بود، به بعد از فرآیند انحلال منتقل کرده‌اند [۲۲]. آن‌ها یک فرآیند صنعتی طراحی کردند که شامل چندین واحد جداگانه و دو مخزن ذخیره حلال و آب بود. با این حال، در تحقیق حاضر، پس از انجام آزمایش‌ها و مشاهده نتایج، تصمیم گرفته شد که تکنیک هیدروپالپینگ به طور کامل از فرآیند حذف گردد. در این مرحله، چندین روش جایگزین برای جداسازی آلومینیوم از کاغذ امتحان شد. این روش‌ها بر وجه تمایز آلومینیوم و کاغذ در چگالی، وزن و قطبیت استوار بود. مطابق شکل ۵، روش جداسازی براساس اختلاف چگالی برای جداسازی آلومینیوم از کاغذ مؤثر نبود. علی‌رغم چگالی بیشتر آلومینیوم نسبت به آب، قطعات صاف آن در محلول آب نمک به زیر آب می‌رفتند، در حالی که قطعات مچاله شده روی آب باقی می‌ماندند. این پدیده ناشی از تفاوت در تنش سطحی آب در برخورد با سطوح صاف و ناهموار است. مقوا نیز با ساختار چندلایه و وجود ناخالصی برخلاف کاغذ، روی آب می‌ماند. روش‌های دیگری مانند اعمال میدان مغناطیسی، افزایش سطح آب، حرارت دادن محلول‌ها و استفاده از سایر محلول‌ها نیز نتوانست آلومینیوم را از مقوا جدا کند. حضور هوا در ساختار مچاله شده آلومینیوم و لایه‌های مقوا از دلایل اصلی شناور ماندن این مواد روی آب شناخته شد. بنابراین، به نظر رسید که استفاده از روش‌هایی مانند کارگذاری دمنده و یا جداساز جریان‌گردابی (ECS) در انتهای پروسه بازیافت می‌تواند کاغذ را از آلومینیوم جدا کنند. ECS فرآیندی است که به طور گسترده در تأسیسات بازیافت برای جداسازی فلزات غیرآهنی مانند آلومینیوم از مواد غیرفلزی همچون مقوا و پلاستیک استفاده می‌شود. این دستگاه که به یک نوار نقاله متصل است، با یک میدان مغناطیسی قوی، باعث ایجاد جریان‌های گردابی در ذرات فلز غیرآهنی می‌شود. تعامل بین این جریان‌های گردابی و میدان مغناطیسی، نیروی دافعه‌ای ایجاد می‌کند که باعث می‌شود ذرات آلومینیوم از روی نقاله منحرف شده و در یک محفظه جمع‌آوری جداگانه قرار گیرند، در حالی که ذرات غیرفلزی روی نوار نقاله باقی می‌مانند و به طور جداگانه جمع‌آوری می‌شوند [۴۱، ۴۲].

در مقایسه با پژوهش‌های ایرانی، این مطالعه نوآوری قابل توجهی ارائه می‌دهد. برای مثال، مطالعه‌ای [۴۳] از ضایعات تتراپک برای تولید کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک استفاده کرده و نرخ بازیافت پلی‌اتیلن را ۸۰-۹۰٪ گزارش کرده، اما به دلیل وابستگی به هیدروپالپینگ، کیفیت LDPE کاهش یافته و برای کاربردهای غیرخالص مناسب است. مطالعه دیگری [۴۴] بازیافت تتراپک را با رزین MUF برای تولید Carton Board بررسی کرده و نرخ بازیافت کاغذ را ۸۵-۹۵٪ گزارش داده، اما به دلیل عدم استفاده از حلال‌های شیمیایی، جداسازی Al-PE ناقص بوده است. همچنین، [۴۵] بر تولید اوراق فشرده از تتراپک تمرکز دارد، اما نرخ انحلال LDPE را گزارش نکرده و بر روش‌های مکانیکی تکیه دارد. در مقابل، روش پیشنهادی این مطالعه با حذف هیدروپالپینگ و استفاده از مخلوط حلال بنزین:تولن (۲۵:۵۰)، نرخ بازیافت ۱۰۰٪ LDPE و ۹۰٪ حلال را به دست آورده که از نرخ‌های گزارش‌شده در مطالعات ایرانی بالاتر است و با کاهش مصرف آب و انرژی، پایداری محیطی بیشتری ارائه می‌دهد [۴۶].

این برتری به دلیل بهینه‌سازی ترکیب حلال و انتخاب بنزین به عنوان یک حلال ارزان و در دسترس، به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران که سوخت‌های فسیلی با قیمت پایین در دسترس هستند، است. علاوه بر این، حذف هیدروپالپینگ نه تنها مصرف آب و انرژی را به‌طور چشمگیری کاهش داد (حدود یک‌سوم در مقایسه با روش‌های متداول)، بلکه با جلوگیری از باقی‌مانده کاغذ در کامپوزیت‌های Al-PE، کیفیت مواد بازیافتی را بهبود بخشید [۲۲]. استفاده از جداساز جریان‌گردابی (ECS) برای جداسازی آلومینیوم از کاغذ، جایگزینی مؤثر برای روش‌های ناکارآمد مبتنی بر اختلاف چگالی ارائه داد، که با مطالعات بین‌المللی در زمینه جداسازی فلزات غیرآهنی همخوانی دارد [۴۱]. این روش امکان جداسازی دقیق آلومینیوم و کاغذ را فراهم کرد، در حالی که در مطالعات ایرانی قبلی، جداسازی این اجزا اغلب ناقص بود و منجر به تولید ضایعات مخلوط با ارزش پایین می‌شد [۴۴]. از منظر پایداری محیط‌زیستی، روش پیشنهادی با کاهش وابستگی به فرآیندهای پرمصرف و امکان بازیافت حلال‌ها، به کاهش

اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) کمک می‌کند [۴۷]. با این حال، برای کاربرد صنعتی، لازم است خطرات مرتبط با استفاده از حلال‌های فرار مانند بنزین (حاوی بنزن سرطان‌زا) مورد توجه قرار گیرد و راهکارهایی مانند استفاده از سیستم‌های بسته و حلال‌های سبزتر بررسی شود [۴۸].

در مقایسه با مطالعات بین‌المللی، روش پیشنهادی با پژوهش‌هایی مانند مطالعه [۲۲] قابل‌مقایسه است که از زایلن و تولوئن برای انحلال LDPE استفاده کردند و نرخ بازیابی ۹۵٪ را گزارش نمودند. با این حال، وابستگی به حلال‌های گران‌قیمت و فرآیند هیدروپالپینگ در این مطالعه هزینه‌ها را افزایش داد و کارایی را محدود کرد. مطالعه دیگری [۲۵] با استفاده از زایلن در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس تنها ۵۶٪ بازیابی LDPE را گزارش کرد، که به دلیل عدم بهینه‌سازی ترکیب حلال و زمان طولانی پردازش (۳۶۰ دقیقه) بود. روش حاضر با کاهش دما به ۱۲۰ درجه سلسیوس، زمان پردازش به ۳۰ دقیقه، و استفاده از بنزین به‌عنوان حلال اقتصادی، کارایی و مقرون‌به‌صرفه بودن را بهبود بخشید. این نوآوری‌ها، همراه با حذف هیدروپالپینگ و استفاده از ECS، این روش را به گزینه‌ای رقابتی برای بازیافت بسته‌بندی‌های آسپتیک تبدیل کرده است که می‌تواند در مقیاس صنعتی، به‌ویژه در کشورهایی با دسترسی به سوخت ارزان، پیاده‌سازی شود. با این حال، برای تعمیم‌پذیری به بسته‌بندی‌های پیچیده‌تر (مانند بسته‌بندی‌های متالایز با درصد پلاستیک بالاتر)، نیاز به تنظیمات بیشتر در نسبت حلال‌ها و شرایط عملیاتی وجود دارد [۷].

مقایسه با روش‌های گرمایی مانند پیرولیز نیز نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی است. پیرولیز، همان‌طور که در مطالعه [۳۳] گزارش شده، به دلیل نیاز به دماهای بالا (بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس) و مصرف انرژی زیاد، از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی کمتر پایدار است. در مقابل، روش انحلال-تقطیر پیشنهادی با دمای عملیاتی پایین‌تر (۲۱۰ درجه سلسیوس در مرحله تقطیر) و بازیابی ۹۰٪ حلال‌ها، مصرف انرژی را کاهش داده و امکان استفاده مجدد از مواد را با خلوص بالا فراهم می‌کند [۱۸]. این روش همچنین با اصول اقتصاد چرخشی هم‌راستا است، زیرا امکان استفاده مجدد مستقیم از LDPE، کاغذ و آلومینیوم را بدون نیاز به فرآیندهای پیچیده فراهم می‌آورد. با این حال، برای مقیاس‌پذیری صنعتی، ارزیابی چرخه حیات (LCA) برای بررسی اثرات زیست‌محیطی حلال‌ها و تحلیل هزینه-فایده دقیق‌تر، به‌ویژه در مناطقی با قیمت بالای سوخت، ضروری است [۴۸]. در مجموع، این مطالعه با ارائه روشی کارآمد، پایدار و اقتصادی برای بازیافت بسته‌بندی‌های آسپتیک، گامی مهم در جهت کاهش ضایعات و تحقق اقتصاد چرخشی برداشته است.



شکل ۵. چالش‌های جداسازی آلومینیوم از مقوا با استفاده از روش اختلاف چگالی.
Figure 5. Challenges in separating aluminum from cardboard using the density difference method.

۳.۷. خطرات ایمنی و محیط‌زیستی حلال‌های مورد استفاده

حلال‌های آلی زایلن، تولوئن و بنزین، که در انحلال پلی‌اتیلن کم‌چگالی از کارتن‌های آسپتیک استفاده شدند، به دلیل ماهیت فرار و سمی خود خطرات ایمنی و زیست‌محیطی قابل‌توجهی دارند. این حلال‌ها قابل اشتعال بوده و می‌توانند خطر آتش‌سوزی یا انفجار ایجاد کنند. استنشاق بخارات آن‌ها ممکن است به تحریک سیستم تنفسی، پوست و چشم‌ها منجر شود و تماس طولانی‌مدت می‌تواند به سیستم عصبی مرکزی یا کبد آسیب برساند، به‌ویژه بنزین که حاوی بنزن (ماده‌ای سرطان‌زا) است [۴۹، ۵۰]. از نظر محیط‌زیستی، انتشار بخارات این حلال‌ها به تشکیل ازن در سطح زمین و آلودگی هوا کمک می‌کند و در صورت نشت یا دفع نامناسب، می‌توانند خاک و آب‌های زیرزمینی را آلوده کرده و اثرات طولانی‌مدت بر اکوسیستم‌ها داشته باشند [۴۷].

برای کاهش این خطرات، استفاده از سیستم‌های تهویه پیشرفته، تجهیزات حفاظت فردی (مانند ماسک و دستکش) و حسگرهای تشخیص نشت ضروری است. بازیابی ۹۰٪ حلال‌ها از طریق تقطیر بسته، انتشار بخارات را کاهش می‌دهد و دفع ایمن باقی‌مانده حلال‌ها از آلودگی محیط‌زیست جلوگیری می‌کند. تحقیقات آینده می‌توانند بر حلال‌های سبزتر، مانند حلال‌های زیستی یا آب فوق بحرانی، تمرکز کنند تا پایداری فرآیند بهبود یابد [۴۸]. ارزیابی چرخه حیات (LCA) برای بررسی اثرات زیست‌محیطی کلی و آموزش کارگران برای کار ایمن با حلال‌ها نیز توصیه می‌شود. این اقدامات، فرآیند بازیافت را ایمن‌تر و پایدارتر کرده و امکان مقیاس‌پذیری صنعتی را با حداقل تأثیرات منفی فراهم می‌کند.

۳.۸. تحلیل اقتصادی و انرژی و مقایسه با روش‌های متداول بازیافت

ارزیابی اقتصادی و انرژی روش پیشنهادی نشان می‌دهد که استفاده از مخلوط حلال بنزین، زایلن و تولوئن (در نسبت بهینه) بدون نیاز به هیدروپالپینگ می‌تواند از نظر هزینه و مصرف انرژی رقابتی باشد. مهم‌ترین عامل هزینه‌ای در این فرآیند به مصرف

حلال‌ها مربوط می‌شود؛ اما به دلیل امکان بازیافت و استفاده مجدد از حدود ۹۰ درصد حلال‌ها، هزینه عملیاتی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، حذف مرحله هیدروپالپینگ منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های آب و تجهیزات مکانیکی می‌شود.

از دیدگاه انرژی، فرآیند انحلال و تقطیر به گرمایش نیاز دارد، اما مقدار انرژی مصرفی آن در محدوده فرآیندهای شیمیایی رایج قرار می‌گیرد. در مقایسه با روش‌های گرمایی نظیر پیرولیز که انرژی بر هستند، روش حاضر مصرف انرژی کمتری داشته و با حذف هیدروپالپینگ، حدود یک‌سوم کاهش مصرف انرژی حاصل می‌شود. از نظر اقتصادی، مزیت اصلی این روش در کشورهایی است که بنزین ارزان‌قیمت در دسترس دارند (مانند ایران)، زیرا حضور بنزین در ترکیب حلال‌ها موجب کاهش چشمگیر هزینه نهایی می‌شود. در مقابل، در کشورهایی با قیمت بالای سوخت‌های فسیلی (مانند هلند و بسیاری از کشورهای اروپای غربی)، استفاده از زایلین و تولوئن به‌تنهایی یا انتخاب حلال‌های جایگزین پایدارتر می‌تواند مقرون‌به‌صرفه‌تر باشد. در مقایسه با روش‌های مرسوم بازیافت کارتن‌های آسپتیک، مانند هیدروپالپینگ که بیشتر بر بازیافت کاغذ تمرکز دارد و معمولاً پلی‌اتیلن و آلومینیوم به‌صورت مخلوط و با خلوص پایین باقی می‌مانند، روش حاضر امکان بازیابی هر سه جزء اصلی (پلی‌اتیلن، کاغذ و آلومینیوم) را با خلوص بالاتر فراهم می‌کند. همچنین، انعطاف‌پذیری انتخاب نوع حلال متناسب با شرایط اقتصادی و منطقه‌ای، این روش را برای کشورهای مختلف قابل انطباق می‌سازد.

با وجود این مزایا، لازم است به خطرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار ترکیبات آلی فرار توجه شود. بنابراین استفاده از سیستم‌های بسته، کنترل انتشار و بررسی امکان جایگزینی حلال‌های ایمن‌تر در مقیاس صنعتی ضروری خواهد بود. در مجموع، روش پیشنهادی از نظر اقتصادی و انرژی می‌تواند گزینه‌ای کارآمدتر از برخی روش‌های شیمیایی و گرمایی متداول باشد و به‌ویژه برای کشورهایی با محدودیت منابع آب و انرژی یا دسترسی به سوخت ارزان، مزیت بیشتری دارد.

بسته‌بندی آسپتیک ساخته شده از لایه‌های لمینیت شده کاغذ، پلی‌اتیلن و آلومینیوم، باعث ذخیره‌سازی استریل مواد غذایی می‌شود، اما به دلیل دشواری جداسازی اجزا، چالش‌های بازیافت را به همراه دارد. این مطالعه یک روش بازیافت حلقه‌بسته جدید برای بسته‌بندی آسپتیک ارائه داده است که از فرآیند هیدروپالپینگ معمول اجتناب می‌کند. مواد و روش‌های کلیدی شامل استفاده از مخلوط حلال بهینه‌شده بنزین:زایلین:تولوئن (۵۰:۲۵:۲۵) حجم/حجم برای انحلال انتخابی لایه پلی‌اتیلن بود، که امکان بازیابی آن به صورت LDPE با تقطیر را فراهم می‌آورد. پارامترهای آزمایشی مانند نسبت جامد به مایع، درزهای دولایه، زمان و دما به طور سیستماتیک بهینه‌سازی شدند تا انحلال کامل پلی‌اتیلن حاصل شود. برخلاف هیدروپالپینگ که به پلی‌اتیلن آسیب می‌رساند، این روش انحلال-تقطیر، LDPE آسیب‌نندیده را بازیابی می‌کند، که با مطابقت طیف FTIR آن با طیف مرجع PE تأیید شده است. اجزای آلومینیوم و کاغذ پس از انحلال پلی‌اتیلن سالم باقی مانده‌اند. یک روش جدید جریان گردابی برای جداسازی آلومینیوم از لایه‌های کاغذی پیشنهاد شده است که نیازی به پالپینگ معمول ندارد. به نظر می‌رسد این فرآیند بازیافت حلقه‌بسته امکان بازیابی هر سه جزء اصلی - پلی‌اتیلن، آلومینیوم و کاغذ - در اشکال اولیه‌شان را فراهم می‌کند تا مستقیماً مورد استفاده مجدد قرار گیرند. نتایج کلیدی نشان داد که پس از بهینه‌سازی، LDPE ۱۰٪ از برندهای مختلف بسته‌بندی آسپتیک مانند Tetra Pak قابل بازیابی است. تلفات حلال حدود ۱۰٪ است، اما می‌تواند با بازیافت مداوم به حداقل برسد. رنگدانه‌های جزئی از افزودنی‌های بنزین در چرخه اول LDPE تأثیری بر خلوص آن نداشته است. با این حال، این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است؛ از جمله اینکه آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده و نیاز به بررسی مقیاس‌پذیری صنعتی، ارزیابی اقتصادی دقیق و اثرات زیست‌محیطی حلال‌های مورد استفاده (مانند مسائل ایمنی و آلودگی احتمالی) دارد. همچنین، تمرکز بر برندهای محدود ممکن است تعمیم‌پذیری روش را برای تمام انواع بسته‌بندی‌های آسپتیک کاهش دهد. علاوه بر این، بررسی تئوری کاربرد این روش در کارتن‌های آسپتیک با چگالی بالاتر (مانند بسته‌بندی‌های انعطاف‌پذیر متالایز با درصد پلاستیک بیشتر) پیشنهاد می‌شود. در چنین مواردی، افزایش چگالی پلی‌اتیلن ممکن است نیاز به تنظیم نسبت حلال‌ها (مانند افزایش سهم بنزین برای بهبود نفوذ) یا افزایش دما و زمان پردازش داشته باشد تا انحلال کامل بدون آسیب به لایه‌های دیگر حاصل شود. این بررسی می‌تواند پایه‌ای برای گسترش روش به مواد کامپوزیتی پیچیده‌تر فراهم کند و کارایی آن را در مقیاس صنعتی ارزیابی نماید.

- [1] S. Wang, H. Zhu, The adoption of international standards and export behavior of multi-product firms: A perspective based on differentiated competitive strategies, *Economic Analysis and Policy*, 86 (2025) 351-362.
- [2] D. Zmijková, B. Švédová, J. Růžicková, Polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar originated from pyrolysis of aseptic packages (Tetra Pak®), *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 27 (2022) 100682.
- [3] J. Zawadiak, Tetra Pak Recycling – Current Trends and New Developments, *American Journal of Chemical Engineering*, 5(3) (2017) 37-37.
- [4] N.M. Zúñiga-Muro, A. Bonilla-Petriciolet, D.I. Mendoza-Castillo, C.J. Duran-Valle, J. Silvestre-Albero, H.E. Reynel-Avila, J.C. Tapia-Picazo, Recycling of Tetra pak wastes via pyrolysis: Characterization of solid products and application of the resulting char in the adsorption of mercury from water, *Journal of Cleaner Production*, 291 (2021) 125219.
- [5] A. Šleiniūtė, T. Mumladze, G. Denafas, V. Makarevičius, R. Kriūkienė, M. Antonov, S. Vasarevičius, Mechanical Properties of Polymers Recovered from Multilayer Food Packaging by Nitric Acid, *Sustainability*, 16(5) (2024) 2106-2106.
- [6] P. Agamuthu, C. Visvanathan, Extended producers' responsibility schemes for used beverage carton recycling, in, Sage Publications Sage UK: London, England, 2014, pp. 1-3.
- [7] I. Georgiopolou, G.D. Pappa, S.N. Vouyiouka, K. Magoulas, Recycling of post-consumer multilayer Tetra Pak® packaging with the Selective Dissolution-Precipitation process, *Resources, Conservation and Recycling*, 165 (2021) 105268-105268.
- [8] K. Winans, A. Kendall, H. Deng, The history and current applications of the circular economy concept, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 (2017) 825-833.
- [9] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N.M. Bocken, E.J. Hultink, The Circular Economy–A new sustainability paradigm?, *Journal of cleaner production*, 143 (2017) 757-768.
- [10] P. Ghisellini, C. Cialani, S. Ulgiati, A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *Journal of Cleaner Production*, 114 (2016) 11-32.
- [11] J.M. Allwood, Squaring the Circular Economy: The Role of Recycling within a Hierarchy of Material Management Strategies, in, Elsevier, 2014, pp. 445-477.
- [12] B. Geueke, K. Groh, J. Muncke, Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials, *Journal of Cleaner Production*, 193 (2018) 491-505.
- [13] C.T.d.M. Soares, M. Ek, E. Östmark, M. Gällstedt, S. Karlsson, Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios, *Resources, Conservation and Recycling*, 176 (2022) 105905-105905.
- [14] G.L. Robertson, Recycling of aseptic beverage cartons: A review, *Recycling*, 6(1) (2021) 20-20.
- [15] F. Amorim, F. Carvalho, R. Chianelli-Junior, H. da Costa Mattos, J. Reis, Investigation of the mechanical properties of polymer based on Tetra Pak waste, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(12) (2024) 679.
- [16] L. Baskoro, A. Muhammad, K. Yoshikawa, F. Takahashi, Energy and resource recovery from Tetra Pak waste using hydrothermal treatment, *Applied Energy*, 207 (2017) 107-113.
- [17] Y. Ma, Changing Tetra Pak: From waste to resource, *Science Progress*, 101(2) (2018) 161-170.

- [18] C. Samorì, W. Pitacco, M. Vagnoni, E. Catelli, T. Collorichio, C. Gualandi, L. Mantovani, A. Mezzi, G. Sciutto, P. Galletti, Recycling of multilayer packaging waste with sustainable solvents, *Resources, Conservation and Recycling*, 190 (2023) 106832-106832.
- [19] A. Dave, S.N. Reddy, Solvothermal liquefaction of Tetra Pak waste into biofuels and Al₂O₃-carbon nanocomposite, *Waste Management*, 171 (2023) 642-652.
- [20] S.F. Zhang, L.L. Zhang, K. Luo, Z.X. Sun, X.X. Mei, Separation properties of aluminium-plastic laminates in post-consumer Tetra Pak with mixed organic solvent, *Waste Management and Research*, 32(4) (2014) 317-322.
- [21] H. Li, H.A. Aguirre-Villegas, R.D. Allen, X. Bai, C.H. Benson, G.T. Beckham, S.L. Bradshaw, J.L. Brown, R.C. Brown, V.S. Cecon, J.B. Curley, G.W. Curtzwiler, S. Dong, S. Gaddameedi, J.E. García, I. Hermans, M.S. Kim, J. Ma, L.O. Mark, M. Mavrikakis, O.O. Olafasakin, T.A. Osswald, K.G. Papanikolaou, H. Radhakrishnan, M.A. Sanchez Castillo, K.L. Sánchez-Rivera, K.N. Tumu, R.C. Van Lehn, K.L. Vorst, M.M. Wright, J. Wu, V.M. Zavala, P. Zhou, G.W. Huber, Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges, *Green Chemistry*, 24(23) (2022) 8899-9002.
- [22] G.G. Şahin, M. Karaboyacı, Process and machinery design for the recycling of tetra pak components, *Journal of Cleaner Production*, 323 (2021) 129186-129186.
- [23] L. Bláhová, M. Myrta, Separation of beverage cartons layers, *Inzynieria Mineralna*, 2017(1) (2017) 189-194.
- [24] M. Karaboyaci, Process design for the recycling of tetra Pak components, *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(1) (2017) 126-129.
- [25] A. Cervantes-Reyes, A. Núñez-Pineda, C. Barrera-Díaz, V. Varela-Guerrero, G. Martínez-Barrera, E. Cuevas-Yañez, Solvent effect in the polyethylene recovery from multilayer postconsumer aseptic packaging, *Waste Management*, 38 (2015) 61-64.
- [26] C.D. Collins, Implementing Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons, *Phytoremediation: methods and reviews*, (2007) 99-108.
- [27] K.H.D. Tang, Phytoremediation of petroleum hydrocarbons: An update of its recent progress, *Tropical Environment, Biology, and Technology*, 2(2) (2024) 106-123-106-123.
- [28] A.T. Roman-Hubers, A.C. Cordova, A.M. Rohde, W.A. Chiu, T.J. McDonald, F.A. Wright, J.N. Dodds, E.S. Baker, I. Rusyn, Characterization of compositional variability in petroleum substances, *Fuel*, 317 (2022) 123547.
- [29] G.S. Kumar, V.R. Kumar, G. Madras, Continuous distribution kinetics for the thermal degradation of LDPE in solution, *Journal of Applied Polymer Science*, 84(4) (2002) 681-690.
- [30] M. Group, Product Catalogue Low Density Polyethylene Bralen+ Tipolen, (2017).
- [31] K. Tomaszewska, J. Kałużna-Czaplińska, W. Józwiak, Thermal and thermo-catalytic degradation of polyolefins as a simple and efficient method of landfill clearing, *Polish Journal of Chemical Technology*, 12(3) (2010) 50-57.
- [32] J.E. Mark, Polymer Data Handbook, *Polymer Data Handbook*, (2009).
- [33] J. Haydary, D. Susa, J. Dudáš, Pyrolysis of aseptic packages (tetrapak) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition, *Waste Management*, 33(5) (2013) 1136-1141.
- [34] R.L. Plackett, J.P. Burman, The design of optimum multifactorial experiments, *Biometrika*, 33(4) (1946) 305-325.
- [35] J.G. Tavera-Sainz, H. Minor-Popocatl, O. Aguilar-Mejía, A.F. Miranda-Perez, Improving laser welding penetration depth process capability for automotive seat adjusters, *Quality Engineering*, (2025) 1-15.

- [36] J.V. Gulmine, P.R. Janissek, H.M. Heise, L. Akcelrud, Polyethylene characterization by FTIR, *Polymer Testing*, 21(5) (2002) 557-563.
- [37] P. Shoaie, A. Bazargan, Emergence of gasoline as a cheap and effective solvent for recycling shelf-stable multi-layer aseptic cartons, (2024).
- [38] C.M.A. Lopes, M.I. Felisberti, Composite of low-density polyethylene and aluminum obtained from the recycling of postconsumer aseptic packaging, *Journal of Applied Polymer Science*, 101(5) (2006) 3183-3191.
- [39] K. Pielichowski, J. Njuguna, T.M. Majka, *Thermal degradation of polymeric materials*, Elsevier, 2022.
- [40] G. Gałko, M. Sajdak, Trends for the thermal degradation of polymeric materials: Analysis of available techniques, issues, and opportunities, *Applied Sciences*, 12(18) (2022) 9138.
- [41] Y.R. Smith, J.R. Nagel, R.K. Rajamani, Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review, *Minerals Engineering*, 133 (2019) 149-159.
- [42] Z. Huang, J. Zhu, X. Wu, R. Qiu, Z. Xu, J. Ruan, Eddy current separation can be used in separation of non-ferrous particles from crushed waste printed circuit boards, *Journal of Cleaner Production*, 312 (2021) 127755-127755.
- [43] M. Ebadi, M. Farsi, P. Narchin, M. Madhoushi, The effect of beverage storage packets (Tetra Pak™) waste on mechanical properties of wood-plastic composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(12) (2016) 1601-1610.
- [44] M. Hassanpour, Evaluation of Iranian recycling industries, *Journal of waste recycling*, 2(2) (2017) 1-7.
- [45] M. Ebadi, M. Farsi, P. Narchin, Some of the physical and mechanical properties of composites made from Tetra Pak™/LDPE, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31(8) (2018) 1054-1065.
- [46] M. Hajizarghani, The Role of Design Considerations in Life Cycle Sustainability Performance of Water and Carbon: A Case Study of Shamsabad Industrial Park, (2023).
- [47] W.H. Organization, *Guidelines for drinking-water quality*, World health organization, 2004.
- [48] F. Chemat, M.A. Vian, G. Cravotto, Green extraction of natural products: Concept and principles, *International journal of molecular sciences*, 13(7) (2012) 8615-8627.
- [49] P.H. IARC, I. Combustions, I.A.f.R.o. Cancer, *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*, vol. 100 (E), Lyon: IARC, (1997).
- [50] N.A. Suaidi, M.A. Alshawsh, S.-Z. Hoe, M.H. Mokhtar, S.R.M. Zin, Toxicological effects of technical xylene mixtures on the female reproductive system: A systematic review, *Toxics*, 10(5) (2022) 235.

A Sustainable Approach to Recycling Multi-Layer Aseptic Packaging

Abstract: Recycling aseptic cartons poses significant challenges due to their complex multi-layer structure. This study focuses on optimizing the dissolution of low-density polyethylene (LDPE) to develop an efficient recycling method for these materials. Cartons from various brands were collected, cleaned, and dried, with LDPE dissolved using a solvent blend of xylene, toluene, and gasoline. The Plackett-Burman experimental design was employed to identify key factors affecting dissolution. The optimal solvent ratio was determined to be 50:25:25 (v/v) gasoline, xylene, and toluene. Critical parameters, in order of influence, included the solid-to-liquid ratio, double-layer seams, temperature, and time. Under optimal conditions (120°C for 30 minutes), complete LDPE dissolution was achieved across all brands. Recovery rates reached 100% for LDPE and 90% for the solvent. Traditional methods for separating aluminum from paper proved ineffective, but an eddy current separator (ECS) was identified as a viable solution. Furthermore, omitting the hydropulping step enhanced LDPE dissolution. This research paves the way for more effective recycling strategies, supporting sustainable waste management and advancing the circular economy. Additional studies on scalability, economic feasibility, and environmental impact are required for industrial application.

Keywords: Tetra Pak; Aseptic cartons; Multi-layer composites; Chemical recycling; Eddy current separation