

## Original Article



# An Innovative Approach to Recycling the Al-PE Composite Residue from Aseptic Cartons Using Gasoline as a Solvent

Received: 2024.08.20

Accepted: 2024.12.23

Pouya Shoaie, Alireza Bazargan\*

Department of  
Environmental Engineering,  
Faculty of Environment,  
University of Tehran, Iran

## EXTENDED ABSTRACT

**Introduction:** Aseptic containers are multilayer packaging materials widely used in the food industry. These packaging materials play an important role in preserving the quality and taste of food products and, by providing high resistance to external contaminants, help maintain the freshness and shelf life of food items. However, the complex and composite structure of these packages, consisting of multiple layers of polyethylene and aluminum, has turned their recycling process into a serious challenge. The aim of this study was to explore the possibility of using solvents to separate and recycle polyethylene-aluminum (Al-PE) composites from aseptic containers and to improve their recycling process.

**Materials and Methods:** In this study, Al-PE composites were obtained from a recycling company after undergoing the hydro-pulping process. To evaluate the possibility of polyethylene dissolution and its separation from aluminum, ten different solvents were tested, including xylene, toluene, ethanol, formic acid, water, isopropyl alcohol, acetic acid, methanol, gasoline, and ethyl acetate. The experiments were conducted in two stages: the first stage, preliminary screening at 60°C, and the second stage, additional tests at 90°C.

**Results and Discussion:** In the preliminary screening, it was found that xylene and toluene, due to their aromatic structure and moderate polarity, were the most effective solvents for dissolving low-density polyethylene (LDPE). These solvents, due to their high ability to dissolve and swell LDPE polymer chains, achieved the highest dissolution percentages. In the second stage, increasing the temperature to 90°C significantly improved the dissolution rate and amount of LDPE. Additionally, adding water to these solvents in small volumetric ratios effectively enhanced polyethylene dissolution. Optimization of the conditions showed that a volume mixture of xylene, toluene, and water in a ratio of 10:37:53 could achieve up to 95% LDPE dissolution. Furthermore, to explore the use of cheaper and more accessible solvents, gasoline was evaluated due to its high concentration of BTEX compounds. The results showed that using gasoline could achieve up to 85% LDPE dissolution.

**Conclusion:** This study demonstrated that using solvents, especially aromatic compounds such as xylene and toluene, can be an effective approach for separating and recycling Al-PE composites from aseptic containers. Additionally, gasoline was introduced as an economical and accessible alternative that could play a significant role in improving the economic viability of the recycling process.

**Keywords:** Recycling; (Al-PE) Composite; Aromatic Solvents; Optimization; Gasoline

### How to cite this article:

Shoaie, P. and Bazargan, A., 2025. An innovative approach to recycling the Al-PE composite residue from aseptic cartons using gasoline as a solvent. *Adv. Environ. Sci.* 23(1): 191-210.

\* Corresponding Author Email Address: alireza.bazargan@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.236642.1431



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## رویکرد نوآورانه در بازیافت ترکیب آلومینیم و پلی اتیلن باقی مانده از کارتن‌های آسپتیک توسط بنزین به عنوان حلال

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

پویا شعاعی، علی‌رضا بازارگان\* 

گروه مهندسی محیط زیست،  
دانشکده محیط زیست، دانشگاه  
تهران، ایران

### چکیده مبسوط

**سابقه و هدف:** ظروف آسپتیک (تتراپک) بسته‌بندی‌های چندلایه‌ای هستند که در صنعت غذایی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این بسته‌بندی‌ها نقش مهمی در حفظ کیفیت و طعم مواد غذایی دارند و با مقاومت بالا در برابر نفوذ عوامل خارجی، به حفظ تازگی و ماندگاری محصولات غذایی کمک می‌کنند. با این حال، ساختار این بسته‌بندی‌ها از لایه‌های مختلف پلی‌اتیلن و آلومینیم، فرآیند بازیافت آن‌ها را به چالشی جدی تبدیل کرده است. هدف از این مطالعه، بررسی امکان استفاده از حلال‌ها برای جداسازی و بازیافت ترکیبات پلی‌اتیلن-آلومینیم (AI-PE) از ظروف آسپتیک و بهبود فرآیند بازیافت آن‌ها است.

**مواد و روش‌ها:** در این مطالعه، کامپوزیت‌های AI-PE پس از فرآیند هیدروپالپینگ از یک شرکت بازیافت تهیه شدند. به منظور بررسی امکان انحلال پلی‌اتیلن و جداسازی آن از آلومینیم، ده حلال مختلف شامل زایلن، تولوئن، اتانول، اسید فرمیک، آب، ایزوپروپیل الکل، اسید استیک، متانول، بنزین و اتیل استات مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌ها در دو مرحله انجام شدند: مرحله اول، غربال‌گری اولیه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و مرحله دوم، آزمایش‌های تکمیلی در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد.

**نتایج و بحث:** در غربال‌گری اولیه، مشخص شد که زایلن و تولوئن به دلیل ساختار آروماتیک و قطبیت متوسط، موثرترین حلال‌ها برای انحلال پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE) هستند. این حلال‌ها به دلیل قابلیت بالای خود در حل کردن و متورم کردن زنجیره‌های پلیمری LDPE، توانستند بیشترین درصد انحلال را فراهم کنند. در مرحله دوم آزمایش‌ها، افزایش دما به ۹۰ درجه سانتی‌گراد موجب بهبود قابل توجهی در نرخ و میزان انحلال LDPE شد. همچنین، اضافه کردن آب به این حلال‌ها در نسبت‌های حجمی کم، انحلال پلی‌اتیلن را افزایش داد. بهینه‌سازی شرایط نشان داد که ترکیب حجمی زایلن، تولوئن و آب به نسبت ۳۷:۵۳:۱۰ می‌تواند منجر به ۹۵٪ انحلال LDPE شود. در ادامه، به منظور بررسی امکان استفاده از حلال‌های ارزان‌تر و در دسترس‌تر، بنزین به دلیل غلظت بالای ترکیبات BTEX مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده از بنزین، می‌توان به ۸۵٪ انحلال LDPE دست یافت.

**نتیجه‌گیری:** مطالعه حاضر نشان داد که استفاده از حلال‌ها، به ویژه ترکیبات آروماتیک مانند زایلن و تولوئن، می‌تواند رویکرد موثری برای جداسازی و بازیافت کامپوزیت‌های AI-PE از ظروف آسپتیک باشد. همچنین، بنزین به عنوان یک جایگزین اقتصادی و در دسترس معرفی شد که می‌تواند در بهبود اقتصادی فرآیند بازیافت نقش موثری ایفا کند.

**واژه‌های کلیدی:** بازیافت؛ کامپوزیت آلومینیم-پلی‌اتیلن؛ حلال‌های آروماتیک؛ بهینه‌سازی؛ بنزین

*استناد به این مقاله: شعاعی، پ. و ع. بازارگان. ۱۴۰۴. رویکرد نوآورانه در بازیافت ترکیب آلومینیم و پلی‌اتیلن باقی مانده از کارتن‌های آسپتیک توسط بنزین به عنوان حلال. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۱۰-۱۹۱: (۱) ۲۳*

\* Corresponding Author Email Address: alireza.bazargan@ut.ac.ir

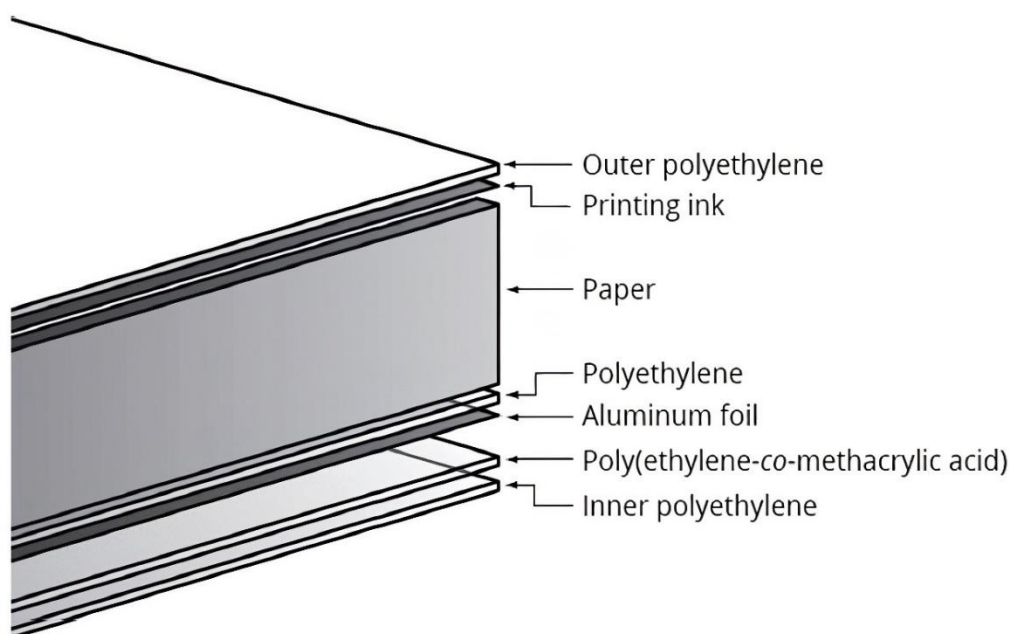
DOI: 10.48308/envs.2025.236642.1431



## مقدمه

به طور کلی، محتوای کاغذ حدود ۷۵٪ از وزن کل بسته، ۲۰٪ از PE و ۵٪ باقی مانده از یک لایه نازک آلومینیوم است (Abreu 1999). از کاغذ برای کمک به تأمین شکل نهایی محصول و افزایش استحکام استفاده می‌شود. فویل آلومینیوم به دلیل خواص عالی آن در برابر عوامل مانند نور، اکسیژن، بخار آب و میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌شود. PE کارکردهای متعددی دارد: بسته‌بندی را از تماس با آب محافظت می‌کند، از برخورد مستقیم لایه آلومینیوم با محتوای بسته‌بندی جلوگیری می‌کند و لایه‌ها را به هم متصل می‌نماید (Zawadiak 2017).

بسته‌بندی آسپتیک مواد غذایی مایع ایده‌ای از اریک والنبرگ بود که توسط روبن راوزینگ ثبت اختراع شد و در سال ۱۹۵۲ به بازار عرضه گشت (Georgiopoulou *et al.* 2021). امروزه چهار شرکت بزرگ بیشتر کارتن‌های آسپتیک را به صنعت غذایی جهانی عرضه می‌کنند: SIG Combibloc، Tetra Pak، Robertson Greatview Aseptic Packaging و Elopak (2021). ساختار معمول یک کارتن آسپتیک (تتراپک) در شکل ۱ نشان داده شده است. نوع کاغذ مورد استفاده در کارتن‌های نوشیدنی آسپتیک بسته به محصول بسته‌بندی شده، منطقه فروش و شرایط تولید متفاوت است. با این حال،



شکل ۱- ساختار معمول بسته‌بندی آسپتیک (Robertson 2021)

Fig. 1- Typical Structure of Aseptic Packaging.

موجود برای این نوع از مدیریت پسماند و دفع محدود هستند. پیشنهاد شده است که کامپوزیت‌های AI-PE به عنوان منبع جایگزین انرژی در پیرولیز (Korkmaz *et al.* 2009)، بازیافت برای کاربردهای ثانویه (Lopes and Felisberti 2006، Hidalgo 2011) یا سوزاندن (Varžinskas, Staniškis, and Knašyte 2012) استفاده شوند. در تمامی این موارد، مشکل کلی دفع پسماند به طور کامل حل نشده است، زیرا مواد باقی‌مانده و

اگرچه سلولز در کارتن آسپتیک می‌تواند بازیافت و در صنعت کاغذ مجدداً استفاده شود، اما پسماندهای جامد باقی‌مانده، به ویژه مخلوطی از پلی‌اتیلن کم‌چگالی و کامپوزیت‌های آلومینیومی، همچنان چالش‌برانگیز هستند. ویژگی کامپوزیت AI-PE حاصل از بسته‌بندی آسپتیک پس‌مصرف این است که هر دو جزء پلاستیکی و فلزی به شدت به یکدیگر چسبیده‌اند و جدا کردن آن‌ها به وسیله فرآیندهای مکانیکی دشوار است. در نتیجه، پروتکل‌های

بازیابی لایه آلومینیوم را فراهم آورند. LDPE با خلوص بالا (تا ۹۹.۶٪ وزنی) و آلومینیوم (تا ۰.۸٪ وزنی) پس از مراحل رسوب پلیمر/حذف حلال به دست آمد. گفتنی است که LDPE بازیافت شده خواص گرمایی و مکانیکی مشابه پلیمر بکر را حفظ کرد. ارزیابی پارامترهای اکوتوکسیکولوژیکی، کیفیت آلومینیوم، بازیافت حلال و مصرف انرژی CPME را به عنوان حلال پایدار با بیشترین پتانسیل برای این کاربرد شناسایی کرد. مطالعه دیگری (Şahin and Karaboyacı 2021a) از سیزده حلال مختلف استفاده کرد. انحلال پلی اتیلن بررسی شد و کاغذ با استفاده از فرایند هیدروپالپینگ حذف شد. بهترین بازده در انحلال LDPE با استفاده از تری کلرواتیلن، زایلن، بنزن، تولوئن، تری کلرواتیلن: آب (۵۰:۵۰، حجم/حجم)، تری کلرواتیلن: آب (۳۰:۷۰، حجم/حجم) و بنزن: تری کلرواتیلن (۵۰:۵۰، حجم/حجم) به دست آمد. محققان مشاهده کردند که هنگام کار در دمای جوش تری کلرواتیلن، زایلن و تولوئن، انحلال ۴ دقیقه زودتر رخ داد و دما نقش حیاتی در فرآیند جداسازی داشت. مطالعه قدیمی تری (Cervantes-Reyes et al. 2015) از زایلن، تولوئن و هگزان برای جداسازی AI از PE استفاده کرد. مخلوطی از کامپوزیت های AI-PE (۱/۵ گرم) و حلال مربوطه (۲۰۰ میلی لیتر) به مدت ۶ ساعت در دمای رفلکس هم زده شد. از طریق این روش، ۵۶٪ از پلی اتیلن بازیافت شد. زایلن بیشترین توانایی را در حل کردن پلی اتیلن داشت. در همان زمان، مطالعه دیگری (Rodríguez-Gómez et al. 2015) از پسماند روغن خوراکی برای جداسازی آلومینیوم از پلی اتیلن استفاده کرد. فرآیند جداسازی شامل هشت مرحله بود. پلی اتیلن با حلال های مختلف مانند اتانول، کلروفرم و ایزوپروپیل الکل و آلومینیوم با اتانول شسته شد. آن ها دریافتند که ایزوپروپیل الکل بهترین حلال برای حذف LDPE در مقایسه با سایر حلال ها بود. نرخ بازیافت پلی اتیلن و آلومینیوم به ترتیب ۸۵٪ و ۸۰٪ گزارش شد و تلفات ناشی از شستشو با حلال های مختلف مشاهده شد.

دی اکسید کربن تولید می شود و امکان سنجی اقتصادی گزینه های پیشنهادی زیر سؤال می رود (Cervantes-Reyes et al. 2015). طیف وسیعی از فرایندهای مکانیکی، شیمیایی و حرارتی برای جداسازی باقی مانده کامپوزیت AI-PE پیشنهاد شده است (Tamizhdurai et al. 2024). رویکردهای شیمیایی شامل حل کردن LDPE، حذف آلومینیوم و تبخیر حلال یا افزودن یک ضدحلال برای بازیافت LDPE است (Robertson 2021). جداسازی با حلال ها توجه زیادی از پژوهشگران را به خود جلب کرده است (Dave and Reddy 2023). انتخاب حلال مناسب برای انواع خاص پسماند پلاستیکی کلید امکان پذیری بازیافت پلاستیک براساس انحلال است (Li et al. 2022). در واقع، آب فوق بحرانی، اسیدهای معدنی و حلال های آلی مانند اسید هیدروکلریک، سدیم هیدروکسید، اسید نیتریک، اسید فرمیک، اسید استیک، اجزای منفرد مانند بنزن و استون و حلال های مخلوط به کار گرفته شده اند (Šleiniūtė et al. 2024). یک مطالعه از زایلن به عنوان حلال برای انحلال LDPE و ایزوپروپانول به عنوان ضدحلال برای رسوب آن استفاده کرده است (Georgiopoulou et al. 2021). محققان دریافتند که برای حذف پلاستیک از فویل آلومینیوم و دستیابی به بازیافت بالای LDPE استفاده از سه مرحله متوالی ضروری است. بنابراین، گرمایش (۸۵ درجه سانتی گراد) و هم زدن (۳۰۰ دور در دقیقه) برای ۲ ساعت در اولین تکرار و ۱ ساعت برای تکرار دوم و سوم اعمال شد. در نهایت، این فرآیند به تولید پودر LDPE سفید و ورق های آلومینیومی منجر شد. مطالعه اخیر دیگری (Samori et al. 2023) استفاده از حلال های پایدار مانند بیودیزل، ۲-متیل تتراهیدروفوران (2-MeTHF) و اتر سیکلوپنتیل متیل (CPME) را برای انحلال انتخابی و بازیافت LDPE و آلومینیوم از پسماند بسته بندی چندلایه باقی مانده بررسی کرده است. این حلال ها توانستند LDPE را در دمای ۷۰- ۱۵۰ درجه سانتی گراد به طور موثر حل کنند و امکان

نشان داده شود که بنزین - به عنوان یک حلال همه گیر و ارزان - می تواند در بازیافت کارتن های استریل استفاده شود، گام مهمی در این عرصه خواهد بود.

## مواد و روش ها

### مواد

کامپوزیت های AI-PE بعد از فرایند هیدروپالپینگ از یک شرکت بازیافت کارتن های آسپتیک دریافت گشتند. برای یکنواختی بیشتر، مواد دریافتی از الک شماره ۴ عبور داده شدند. قطعاتی که روی الک باقی ماندند، پس از خرد شدن به قطعات کوچکتر از ۲ سانتی متر در هر بعد، مورد استفاده قرار گرفتند.

مواد شیمیایی مورد استفاده، خلوص و نقطه جوش آن ها به همراه بنزین با محدوده جوش ۳۸ تا ۲۰۴ درجه سانتی گراد (Collins 2007; Fuels - Boiling Points 2005)، در جدول ۱ آمده است. این مواد شیمیایی براساس امکان بازیافت LDPE که محدوده تجزیه آن ۲۸۰ تا ۳۶۰ درجه سانتی گراد است (Kumar, Kumar, and Madras 2002; Tomaszewska, Kałuzna-Czaplińska, and Józwiak 2010)، در واحد تقطیر انتخاب شدند.

به عنوان موضوعی که نیاز به بررسی دقیق دارد، مطالعه حاضر بر کارهای قبلی مبتنی است و به بررسی حلال های بالقوه برای بازیافت باقی مانده کامپوزیت AI-PE می پردازد. ابتدا غربال گری با استفاده از ۹ حلال برای تعیین بهترین گزینه ها برای حل کردن پلی اتیلن انجام شد. براساس نتایج که زایلن و تولوئن را به عنوان موثرترین مواد نشان داد، فرض می شود که بنزین، با محتوای آروماتیک شناخته شده خود شامل این ترکیبات، ممکن است به عنوان یک حلال ارزان و در دسترس قابل اجرا باشد. برای ارزیابی این امکان، بنزین برای اولین بار به طور مستقیم به عنوان یک حلال خالص و همچنین در ترکیبات بهینه سازی شده مورد آزمایش قرار گرفت. مدل سازی برای حداکثر کردن کارایی جداسازی کمک می کند و آزمایش های تجربی عملکرد را تأیید می نمایند. هدف، توسعه یک فرآیند ساده جداسازی آلومینیوم- پلی اتیلن با استفاده از دسترسی به بنزین است تا بازیافت را در جایی که مواد شیمیایی خاص محدود هستند، افزایش دهد. اهمیت ویژه این مطالعه در این واقعیت نهفته است که روش های استخراج حلال کنونی اغلب برای اجرا در مقیاس صنعتی بسیار گران هستند. اگر

جدول ۱- مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده شامل خلوص و نقطه جوش.

Table 1. Specifications of the Chemicals Used, Including Purity and Boiling Point.

نقطه جوش (C°)	خلوص (%)	نام ماده شیمیایی
۱۳۸	۹۹	زایلن
۱۱۰	۹۸	تولوئن
۷۸	۹۶	اتانول
۱۰۰	۸۵	اسید فرمیک
۱۰۰	۱۰۰	آب مقطر
۸۲	۹۹	ایزوپروپیل الکل
۱۱۸	۹۹	اسید استیک
۶۴	۹۹	متانول
۷۷	۹۹	اتیل استات
۲۰۴-۳۸		بنزین

## طراحی آزمایش

در این مطالعه از نرم افزار Design Expert نسخه ۱۲ برای طراحی آزمایش استفاده گردید. درصد حجمی حلال‌های مختلف به عنوان متغیر مستقل و درصد انحلال پلی‌اتیلن به عنوان متغیر وابسته انتخاب شدند. محدوده مطلوب عوامل تأثیرگذار از مطالعات پیشین استخراج گردید. برای DoE اول، از مدل مخلوط (طرح غربال‌گری) با نه جزء مخلوط استفاده شد و برای DoE دوم، از مدل مخلوط (طرح شبکه ساده) با چهار جزء مخلوط بهره گرفته شد. در غربال‌گری نخست، سی‌ودو آزمایش (خطی) اجرا گردید و در غربال‌گری دوم، هجده آزمایش (درجه دوم) انجام پذیرفت. پس از انجام آزمایش‌ها، مجدداً از همین نرم افزار برای بهینه‌سازی استفاده شد.

### درصد وزنی خالص اجزای کامپوزیت Al-PE

برای محاسبه درصد انحلال، تعیین میانگین وزن خالص اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت‌ها ضروری است. بدین منظور، از دو روش اسیدشویی (برای محاسبه میانگین درصد وزنی خالص پلی‌اتیلن) و سوزاندن (برای محاسبه میانگین درصد وزنی خالص آلومینیوم) استفاده شد.

### درصد وزنی خالص پلی‌اتیلن

از آنجا که امکان حذف ناخالصی‌ها از کامپوزیت (به دلیل

محافظت لایه‌های پلی‌اتیلنی) تنها با شستشو وجود نداشت، براساس منابع (Yan *et al.* 2015; Zhang, Yan, and Li 2009)، حلالی انتخاب شد که بتواند پلی‌اتیلن را در دمایی زیر نقطه جوش و بدون هیچ‌گونه تلفاتی جدا کند. بدین منظور، برای اطمینان از ناچیز بودن تلفات، اجزای خالص کاغذ، پلی‌اتیلن و آلومینیوم به‌طور جداگانه و تحت شرایط خاصی در حلال انتخاب شده (اسید فرمیک) پردازش شدند. این فرآیند دوبار تکرار شد و تفاوت‌های مشاهده شده ناچیز بود.

برای محاسبه درصد وزنی خالص پلی‌اتیلن، کامپوزیت‌های Al-PE و اسید فرمیک به نسبت ۵۰/۱ (گرم/میلی‌لیتر) در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه بدون هم‌زدن مخلوط شدند تا لایه‌های پلی‌اتیلنی جدا شوند. پس از شستشو و فیلتر کردن، این مواد به ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول آب:اسید سولفوریک ۹۸ درصد (۵۰:۵۰ حجم/حجم) افزوده شدند و پس از حذف کامل اجزا و باقی‌مانده LDPE، از الک شماره ۴۰ عبور کردند. در نهایت، نمونه‌ها در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند (شکل ۲). این آزمایش ۱۰ بار با نمونه‌های مختلف تکرار شد. درصد جرمی PE در نمونه‌های کامپوزیت ۷۵.۱ درصد با انحراف معیار ۱.۶ درصد بود (جدول ۲).



شکل ۲- پلی‌اتیلن خالص باقی‌مانده از کامپوزیت Al-PE.  
Fig. 2- Pure polyethylene remaining from the Al-PE composite.

جدول ۲- درصد وزنی خالص پلی اتیلن در کامپوزیت های Al-PE.  
Table 2. The weight percentage of pure polyethylene in Al-PE composites.

درصد تغییر (%)	بعد از اسیدشویی (gr)	قبل از اسیدشویی (gr)	اجرا
۲۶.۰	۰.۷۴۱۷	۱.۰۰۱۹	۱
۲۶.۹	۰.۷۳۸۱	۱.۰۰۹۱	۲
۲۶.۶	۰.۷۳۶۲	۱.۰۰۳۱	۳
۲۵.۶	۰.۷۴۷۸	۱.۰۰۴۶	۴
۲۵.۹	۰.۷۴۵۰	۱.۰۰۵۴	۵
۲۴.۷	۰.۷۵۶۳	۱.۰۰۴۶	۶
۲۳.۶	۰.۷۶۸۴	۱.۰۰۵۸	۷
۲۴.۲	۰.۷۶۲۹	۱.۰۰۶۱	۸
۲۱.۶	۰.۷۸۶۱	۱.۰۰۲۱	۹
۲۴.۰	۰.۷۶۱۴	۱.۰۰۱۷	۱۰

### درصد وزنی خالص آلومینیوم

یک گرم از کامپوزیت های Al-PE وزن شد و در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت قرار گرفت، سپس دوباره وزن شد تا کاهش وزن مشخص شود (شکل ۳). این آزمایش ۱۰ بار با نمونه های مختلف تکرار شد. مواد باقی مانده

که آلومینیوم بود، ۲۱ درصد از نمونه را با انحراف معیار ۰.۷۵ درصد تشکیل می داد (جدول ۳). باید توجه داشت که مجموع درصد های محاسبه شده آلومینیوم و پلی اتیلن به ۱۰۰ درصد نمی رسید. این به دلیل ناخالصی کاغذی است که در طی فرآیند هیدروپالپینگ در کارخانه بازیافت باقی مانده است.



شکل ۳- آلومینیوم خالص باقی مانده از کامپوزیت Al-PE.  
Fig. 3- Pure aluminum remaining from the Al-PE composite.

جدول ۳- درصد وزنی خالص آلومینیم در کامپوزیت‌های Al-PE.  
Table 3. The weight percentage of pure aluminum in Al-PE composites.

درصد تغییر	بعد از سوزاندن	قبل از سوزاندن	اجرا
(%)	(gr)	(gr)	
۷۸.۶	۰.۲۱۴۹	۱.۰۰۵۷	۱
۸۰.۲	۰.۱۹۸۱	۱.۰۰۲۵	۲
۷۸.۰	۰.۲۲۰۵	۱.۰۰۴۵	۳
۷۹.۱	۰.۲۰۹۲	۱.۰۰۱۴	۴
۷۹.۷	۰.۲۰۴۷	۱.۰۰۶۹	۵
۷۷.۷	۰.۲۲۴۲	۱.۰۰۵۸	۶
۷۸.۷	۰.۲۱۳۹	۱.۰۰۵۸	۷
۷۸.۹	۰.۲۱۱۳	۱.۰۰۲۹	۸
۷۹.۵	۰.۲۰۷۴	۱.۰۰۹۵	۹
۷۹.۱	۰.۲۱۰۷	۱.۰۰۸۱	۱۰

### فرایند انحلال

مطالعه مربوط به انحلال LDPE در دو مرحله صورت گرفت. نخست برای شناسایی حلال‌های منتخب و سپس برای بررسی برهمکنش‌ها در دماهای بالاتر.

### فرایند اول

کامپوزیت‌های Al-PE و حلال‌ها، مطابق جدول ۴، به ازای ۵۰/۱ (گرم/میلی‌لیتر) در یک ارلن‌مایر قرار گرفتند که در حمام روغن قرار داشت. کندانسوری به بالای ارلن‌مایر متصل گردید تا از تلفات فرایند جلوگیری کند. پس از ۱۵ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت همزدن ۲۰۰ دور در دقیقه، فرایند متوقف شد و جامدات از الک شماره ۴۰ عبور داده شدند. پس از شستشو با آب، قطعات جامد در دمای محیط خشک شدند و سپس به

مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک گردند. آن‌گاه، باقی‌مانده‌ها دوباره وزن شدند و درصد تغییر (تغییر نسبی بیان‌شده به صورت درصد) و درصد انحلال پلی‌اتیلن محاسبه گردید.

### فرایند دوم

مجموعه دوم آزمایش‌ها پس از شناسایی مؤثرترین حلال‌ها در مرحله پیشین و انتخاب بنزین به عنوان یک حلال کارآمد و ارزان، انجام گرفت. بدین ترتیب، کامپوزیت‌های Al-PE و حلال‌های مورد نظر تحت شرایط قبلی با این تفاوت که دما از ۶۰ درجه سانتی‌گراد به ۹۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت، براساس جدول ۵ پردازش شدند.



جدول ۴- درصد نسبت حجمی حلال‌های مورد استفاده در مرحله اول آزمایش.

Table 4. The percentage by volume of solvents used in the first stage of the experiment.

مولفه ۱	مولفه ۲	مولفه ۳	مولفه ۴	مولفه ۵	مولفه ۶	مولفه ۷	مولفه ۸	مولفه ۹	اجرا
زایلین	تولونن	اتانول	اسید فرمیک	آب	ایزوپروپیل الکل	اسید استیک	متانول	اتیل استات	
حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	
۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵۵.۶	۵.۶	۵.۶	۱
۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵۵.۶	۲
۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۳
۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵۵.۶	۴
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۰	۱۲.۵	۱۲.۵	۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۶
۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۷
۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۸
۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۰
۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱
۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲
۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۳
۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۴
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۰	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۵
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۰	۱۶
۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵۵.۶	۵.۶	۵.۶	۱۷
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۰	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۸
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۹
۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۲۰
۰	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۲۱
۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۰	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۲۳
۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵۵.۶	۲۴
۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۲۵
۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۱۱.۱	۲۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۲۷
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۲۸
۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵۵.۶	۵.۶	۲۹
۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۰	۳۱
۵.۶	۵۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۵.۶	۳۲

جدول ۵- درصد نسبت حجمی حلال‌های مورد استفاده در مرحله دوم آزمایش.

Table 5. The percentage by volume of solvents used in the second stage of the experiment.

مولفه ۴	مولفه ۳	مولفه ۲	مولفه ۱	اجرا
بنزین	آب	تولون	زایلن	
حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	حجم (%)	
۱۲.۵	۶۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱
۰	۰	۱۰۰	۰	۲
۱۰۰	۰	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۱۰۰	۴
۰	۰	۱۰۰	۰	۵
۰	۰	۵۰	۵۰	۶
۰	۵۰	۵۰	۰	۷
۱۲.۵	۱۲.۵	۶۲.۵	۱۲.۵	۸
۶۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۹
۰	۱۰۰	۰	۰	۱۰
۵۰	۰	۵۰	۰	۱۱
۱۰۰	۰	۰	۰	۱۲
۵۰	۰	۰	۵۰	۱۳
۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۱۴
۱۲.۵	۱۲.۵	۱۲.۵	۶۲.۵	۱۵
۰	۵۰	۰	۵۰	۱۶
۰	۰	۰	۱۰۰	۱۷
۵۰	۵۰	۰	۰	۱۸

## نتایج و بحث

### غربال‌گری اولیه

برای جداسازی پلی‌اتیلن از کامپوزیت‌های AI-PE، ماده با نه حلال و ترکیب آن‌ها پردازش شد. هدف از غربال‌گری اولیه یافتن حلال‌هایی بود که درصد انحلال قابل قبولی داشتند. نتایج انحلال LDPE در جدول ۶ نشان داده شده است. پس از آزمایش‌ها، مشاهده شد که حلال‌ها اثرات متقابل قابل توجهی از خود نشان ندادند. اگرچه برخی حلال‌ها مانند اتیل استات و اسید فرمیک LDPE را حل نکردند، اما در جداسازی لایه‌های پلی‌اتیلن از بقیه کامپوزیت مؤثر بودند. این بدان معناست که گرچه آلومینیوم و پلی‌اتیلن از یکدیگر جدا شدند، اما ماده در فاز مایع حل نشد. در همین حال، حلال‌هایی مانند ایزوپروپیل الکل، اتانول و متانول هم در جداسازی لایه‌ها و هم در انحلال ناموفق بودند. همچنین مشاهده شد که اسیدها قادر به

خمیرکردن باقی‌مانده کاغذ در مرحله پردازش و جداسازی آن از کامپوزیت بودند. نتایج آزمایش‌های ۶ و ۲۸ نشان می‌دهد که زایلن و تولون حلال‌های مؤثری برای انحلال پلی‌اتیلن هستند. این انحلال تا حدودی در هر دما و غلظتی رخ می‌دهد، اگرچه دماها و غلظت‌های بالاتر ترجیح داده می‌شوند. بالاترین درصد انحلال در آزمایشی رخ داد که در آن مخلوط حلال نسبت مساوی از زایلن و تولون بود. در طول آزمایش‌ها، به نظر رسید که آب می‌تواند به اتصال آلومینیوم-پلاستیک نفوذ کرده و نرخ جداسازی را افزایش دهد.

با این حال، بسته به ترکیب حلال‌ها، استفاده از آب در مرحله پردازش باعث کف کردن می‌شد. در این حالت، برخی از قطعات آلومینیوم و کاغذ روی کف شناور می‌شدند و به دیواره‌های کندانسور می‌چسبیدند؛ هم زدن نیز این مشکل را تشدید می‌کرد (شکل ۴).

جدول ۶- درصد انحلال پلی اتیلن در اولین مجموعه از آزمایش‌ها.  
 Table 6. The percentage of polyethylene dissolution in the first set of experiments.

اجرا	وزن قبل از پردازش (gr)	وزن بعد از پردازش (gr)	درصد تغییر (%)	درصد انحلال (%)
۱	۱.۰۰۳۲	۰.۹۵۸۹	۴.۴	۶
۲	۱.۰۰۵۱	۰.۹۵۱۳	۵.۴	۷
۳	۱.۰۰۲۹	۰.۹۳۶۹	۶.۶	۹
۴	۱.۰۰۷۷	۰.۸۸۲۶	۱۲.۴	۱۷
۵	۱.۰۰۵۲	۰.۹۲۸۴	۷.۶	۱۰
۶	۱.۰۰۳۹	۰.۳۵۸۶	۶۴.۳	۸۶
۷	۱.۰۰۳۵	۰.۹۵۳۴	۵.۰	۷
۸	۱.۰۰۱۳	۰.۹۱۸۹	۸.۲	۱۱
۹	۱.۰۰۲۱	۰.۹۷۰۸	۳.۱	۴
۱۰	۱.۰۰۳۲	۰.۹۳۴۲	۶.۹	۹
۱۱	۱.۰۰۵۵	۰.۹۲۳۸	۸.۱	۱۱
۱۲	۱.۰۰۹۳	۰.۹۷۴۹	۳.۴	۵
۱۳	۱.۰۰۳۵	۰.۹۲۸۸	۷.۴	۱۰
۱۴	۱.۰۰۴۸	۰.۹۲۳۵	۸.۱	۱۱
۱۵	۱.۰۰۵۱	۰.۹۲۲۱	۸.۳	۱۱
۱۶	۱.۰۰۲۶	۰.۹۶۱۱	۴.۱	۶
۱۷	۱.۰۰۴۷	۰.۹۲۳۹	۸.۰	۱۱
۱۸	۱.۰۰۱۸	۰.۹۶۵۶	۳.۶	۵
۱۹	۱.۰۰۳۶	۰.۹۲۲۳	۸.۱	۱۱
۲۰	۱.۰۰۵۹	۰.۹۶۱۷	۴.۴	۶
۲۱	۱.۰۰۲۳	۰.۹۰۶۵	۹.۶	۱۳
۲۲	۱.۰۰۷۹	۰.۹۸۴۱	۲.۴	۳
۲۳	۱.۰۰۳۲	۰.۹۴۹۵	۵.۴	۷
۲۴	۱.۰۰۴۸	۰.۸۲۱۳	۱۸.۳	۲۴
۲۵	۱.۰۰۶۹	۰.۹۷۳۸	۳.۳	۴
۲۶	۱.۰۰۶۷	۰.۹۴۰۵	۶.۶	۹
۲۷	۱.۰۰۸۳	۰.۹۸۱۸	۲.۶	۴
۲۸	۱.۰۰۷۱	۰.۴۴۲۸	۵۶.۰	۷۵
۲۹	۱.۰۰۵۸	۰.۹۴۵۹	۶.۰	۸
۳۰	۱.۰۰۷۳	۰.۹۵۲۴	۵.۵	۷
۳۱	۱.۰۰۸۱	۰.۹۴۵۷	۶.۲	۸
۳۲	۱.۰۰۶۲	۰.۹۶۹۸	۳.۶	۵



شکل ۴- تشکیل کف حین پردازش.

Fig. 4- Foam formation during processing.

مؤثر برای بازیافت کارتن‌های آسپتیک باشد. درصد هر ترکیب آروماتیک در بنزین می‌تواند بسته به نفت خام مورد استفاده در فرآیند پالایش، متفاوت باشد. به عنوان مثال، در یک مطالعه (Kostecka, Rabah, and Palmer Jr 1995)، درصد این ترکیبات شیمیایی در نمونه بنزین زایلین ۱۶ درصد، تولوئن ۱۴ درصد، بنزن ۴ درصد و اتیل بنزن ۳ درصد اندازه‌گیری شده است.

بنزین یک محصول پالایش شده از نفت خام است که از مخلوطی از هیدروکربن‌ها، افزودنی‌ها و عوامل مختلط تشکیل شده است. ترکیب معمول هیدروکربن‌های بنزین (درصد حجمی) تقریباً به این شرح است: ۴ تا ۸ درصد آلکان‌ها؛ ۲ تا ۵ درصد آلکن‌ها؛ ۲۵ تا ۴۰ درصد ایزوآلکان‌ها؛ ۳ تا ۷ درصد سیکلوآلکان‌ها؛ ۱ تا ۴ درصد سیکلوآلکن‌ها؛ و ۲۰ تا ۵۰ درصد آروماتیک‌های کل. افزودنی‌ها و عوامل اختلاط به مخلوط هیدروکربنی اضافه می‌شوند تا عملکرد و پایداری بنزین را بهبود بخشند. این ترکیبات شامل عوامل ضدکوبش، آنتی اکسیدان‌ها، غیرفعال‌کننده‌های فلزی، جاذب‌های سرب، عوامل ضدزنگ و ضدیخ، پاک‌کننده‌ها و

#### تمرکز بر زایلین و تولوئن

زایلین و تولوئن توانایی نسبتاً بالایی در حل کردن پلی‌اتیلن و متورم کردن زنجیره‌های پلیمری دارند (Cervantes-Reyes *et al.* 2015; Georgiopoulou *et al.* 2021; Şahin and Karaboyacı 2021b) این امر ممکن است به دلیل ساختار آروماتیک و قطبیت متوسط آن‌ها باشد که اجازه می‌دهد زنجیره‌های پلیمری را از طریق برهمکنش‌های مطلوب مانند پیوندهای  $\pi-\pi$  و نیروهای واندروالسی پراکنده، متورم کنند. پارامترهای حلالیت مناسب، گرانی و پایین و توانایی نفوذ بین زنجیره‌ها نیز با از بین بردن جاذبه‌های بین زنجیره‌ای، انحلال را تسهیل می‌کنند. این ترکیبات شیمیایی معمولاً در محصولات صنعتی و تجاری مانند حلال‌ها، رنگ‌ها و چسب‌ها یافت می‌شوند که به دلیل حلالیت و خواص دیگر برای اهداف خاصی استفاده می‌شوند. از آنجایی که ترکیبات آروماتیک مانند بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلین (که به طور معمول با نام BTEX شناخته می‌شوند) اغلب در بنزین وجود دارند؛ در این مطالعه این فرضیه مطرح شده است که بنزین ممکن است یک حلال

در دسترس بودن و امکان نفوذ و انتشار بین لایه‌های کامپوزیت اضافه شد. بنابراین، حلال‌های زایلن، تولوئن، بنزین (۱) و آب در مرحله دوم آزمایش به شرح زیر استفاده شدند.

### فاز دوم آزمایشات

نتایج انحلال پلی‌اتیلن در فاز دوم آزمایشات در جدول ۷ نشان داده شده است. در این مجموعه آزمایشات، دمای فرآیند به ۹۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. با افزایش دما، نرخ و میزان انحلال نیز افزایش پیدا کرد. روش اختلاف وزن برای محاسبه درصد انحلال با مشاهدات هم‌خوانی داشت و حتی در بالاترین میزان انحلال، تعدادی قطعات کوچک پلیمری در نمونه‌ها باقی ماندند.

رنگ‌ها می‌شوند. در پایان فرآیند تولید، بنزین نهایی معمولاً بیش از ۱۵۰ ترکیب جداگانه دارد، اگرچه در برخی از مخلوط‌ها تا ۱۰۰۰ ترکیب شناسایی شده است (ATSDR (1990). بنزین یک مخلوط پیچیده است که عمدتاً به عنوان سوخت استفاده می‌شود و ترکیب آن همیشه یکسان نیست. بنابراین، برای تأیید ابتدایی کاربرد بنزین به عنوان یک حلال، کامپوزیت‌های دریافت شده با دو نمونه بنزین آزمایش شدند تا تکرارپذیری آن تأیید شود. درصد انحلال پلی‌اتیلن در مخلوط کامپوزیت ۸۴ درصد برای بنزین (۱) و ۸۹ درصد برای بنزین (۲) بود که هر دو قابل قبول و بالا هستند.

در همین حال، آب نیز به حلال‌های انتخاب شده به دلیل

جدول ۷- درصد انحلال پلی‌اتیلن در دومین مجموعه از آزمایش‌ها.

Table 7. The percentage of polyethylene dissolution in the second set of experiments.

اجرا	وزن قبل از پردازش (gr)	وزن بعد از پردازش (gr)	درصد تغییر (%)	درصد انحلال (%)
۱	۱.۰۰۶۱	۰.۵۵۲۰	۴۵.۱	۶۰
۲	۱.۰۰۲۸	۰.۳۳۲۵	۶۶.۸	۸۹
۳	۱.۰۰۷۱	۰.۳۵۶۲	۶۴.۶	۸۶
۴	۱.۰۰۶۳	۰.۳۳۵۰	۶۶.۷	۸۹
۵	۱.۰۰۳۱	۰.۳۲۸۶	۶۷.۲	۹۰
۶	۱.۰۰۷۸	۰.۳۱۴۸	۶۸.۸	۹۲
۷	۱.۰۰۷۲	۰.۳۷۳۶	۶۲.۹	۸۴
۸	۱.۰۰۴۶	۰.۳۳۵۱	۶۶.۶	۸۹
۹	۱.۰۰۵۴	۰.۳۹۳۳	۶۰.۹	۸۱
۱۰	۱.۰۰۵۶	۰.۹۷۸۹	۲.۷	۴
۱۱	۱.۰۰۳۱	۰.۳۱۴۱	۶۸.۷	۹۲
۱۲	۱.۰۰۸۵	۰.۳۷۵۱	۶۲.۸	۸۴
۱۳	۱.۰۰۵۴	۰.۳۵۱۴	۶۵.۰	۸۷
۱۴	۱.۰۰۳۹	۰.۳۶۷۶	۶۳.۴	۸۵
۱۵	۱.۰۰۵۶	۰.۳۳۲۱	۶۷.۰	۸۹
۱۶	۱.۰۰۴۷	۰.۳۷۵۲	۶۲.۷	۸۴
۱۷	۱.۰۰۳۸	۰.۳۲۶۹	۶۷.۴	۹۰
۱۸	۱.۰۰۳۵	۰.۴۱۵۸	۵۸.۶	۷۸

شکل ۶، زمانی که آب به محلول زایلین و تولوئن اضافه می‌شود، مولکول‌های آب به نواحی آمورف پلی‌اتیلن نفوذ می‌کنند و فضاهایی بین زنجیره‌های پلیمری ایجاد می‌کنند. دافعه بین مولکول‌های آب و نواحی آبگریز زنجیره‌های پلیمر، سبب ایجاد این فاصله می‌شود. بنابراین، این فاصله به مولکول‌های زایلین و تولوئن اجازه می‌دهد تا به طور موثرتری با پلیمر در ارتباط باشند.

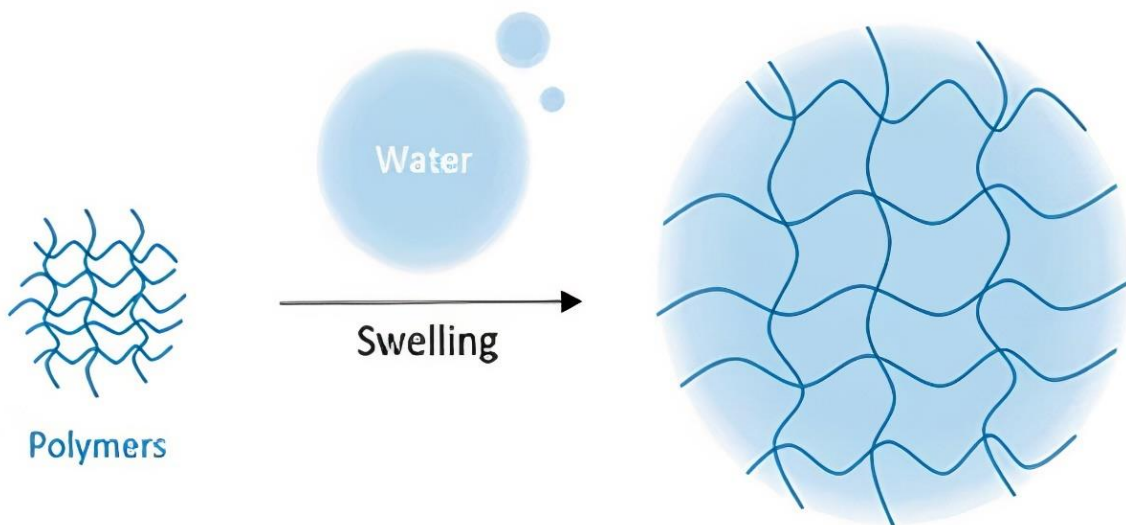
در طول آزمایش‌ها، مشاهده شد که بنزین در تماس با پلی‌اتیلن رفتاری مشابه با حلال‌های انتخاب شده از خود نشان می‌دهد. میزانی که بنزین می‌تواند پلی‌اتیلن را حل یا نرم کند، به دما و زمان بستگی دارد. دماهای بالاتر به مولکول‌های حلال این امکان را می‌دهد تا به طور موثرتری به پلیمر نفوذ نمایند. بنابراین، به طور کلی نتیجه گرفته می‌شود که دما نقش مهمی در حذف پلی‌اتیلن ایفا می‌کند. کامپوزیت پردازش‌شده با بالاترین میزان انحلال در شکل ۷ نشان داده شده است.

در طی آزمایشات، مشاهده شد که محلول حاوی پلی‌اتیلن حل‌شده تا حدودی لزج است (شکل ۵). این نتیجه می‌تواند بسته به دمای پردازش و حلال مورد استفاده، متفاوت باشد. به دلیل وزن مولکولی بالا و ماهیت غیرقطبی، در برخی موارد، به نظر رسید پلی‌اتیلن متورم می‌شود. این رفتار عمدتاً ناشی از توانایی برخی حلال‌ها در نرم کردن پلی‌اتیلن به جای حل کردن آن است. در واقع، پلی‌اتیلن‌ها مانند نمک در آب حل نمی‌شوند، بلکه مولکول‌های حلال به فضاهای بین زنجیره‌های پلیمری نفوذ می‌کنند و آن‌ها را نرم می‌کنند (Miller-Chou and Koenig 2003). در برخی فرآیندها، آب می‌تواند باعث افزایش گرانروی پلی‌اتیلن شود. از نتایج آزمایش‌های ۸، ۹ و ۱۵ مشاهده شد که استفاده از آب با درصد حجمی کم، تا حدودی میزان حل شدن را بهبود می‌بخشد. مکانیسم اصلی در پشت انحلال بهبود یافته پلی‌اتیلن در حضور آب، متورم شدن زنجیره‌های پلیمری است. بر اساس



شکل ۵- مشاهدات مربوط به رفتار انحلالی پلی‌اتیلن. در برخی آزمایش‌ها که درصد حجمی آب بیشتر بود، لزجت پلی‌اتیلن به حدی می‌رسید که دیواره‌های ارلن چرب می‌شد. در این حالت، ویسکوزیته پلی‌اتیلن سبب می‌گشت تا برخی قطعات پس از پردازش به دیواره بچسبند.

**Fig. 5- Observations related to the dissolution behavior of polyethylene. In some experiments, when the volume percentage of water was higher, the viscosity of polyethylene reached such a level that the walls of the Erlenmeyer became greasy. In this case, the viscosity of polyethylene caused some parts to stick to the wall after processing.**



شکل ۶- تورم زنجیره‌های پلیمری در حضور آب (Van Gheluwe *et al.* 2021).

Fig. 6- Swelling of polymer chains in the presence of water.



شکل ۷- کامپوزیت پردازش شده پس از انحلال پلی اتیلن.

Fig. 7- Processed composite after polyethylene dissolution.

حفظ سلسله مراتب نیاز بودند) برای بهبود مدل حذف شدند. آنالیز واریانس (ANOVA) برای مدل ساخته شده در جدول ۸ نشان داده شده است. در این حالت، عدم برازش

پس از فاز دوم آزمایشات، آنالیز و بهینه‌سازی صورت گرفت و مشاهده شد که مدل درجه دوم با داده‌ها مطابقت مناسبی دارد. سپس ترم‌های غیرموثر (به غیر از آن‌هایی که برای

بازیافت، امکان‌پذیری اقتصادی است، یک فرآیند بهینه‌سازی دیگر نیز انجام گرفت، این بار با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها در حالی که به دنبال بالاترین درصد انحلال بود. تحت چنین محدودیت‌هایی، بنزین به عنوان تنها حلال شناسایی شد که منجر به ۸۵ درصد راندمان حذف گردید (شکل B A). در نهایت، برای اعتبارسنجی قدرت مدل، یک آزمایش در نقطه بهینه شده انجام شد. از این آزمایش نتیجه گرفته شد که مدل ساخته‌شده کمتر از یک درصد خطا دارد و درصد انحلال بهینه شده حدود دو درصد بالاتر از بالاترین درصد انحلال آزمایش شده است.

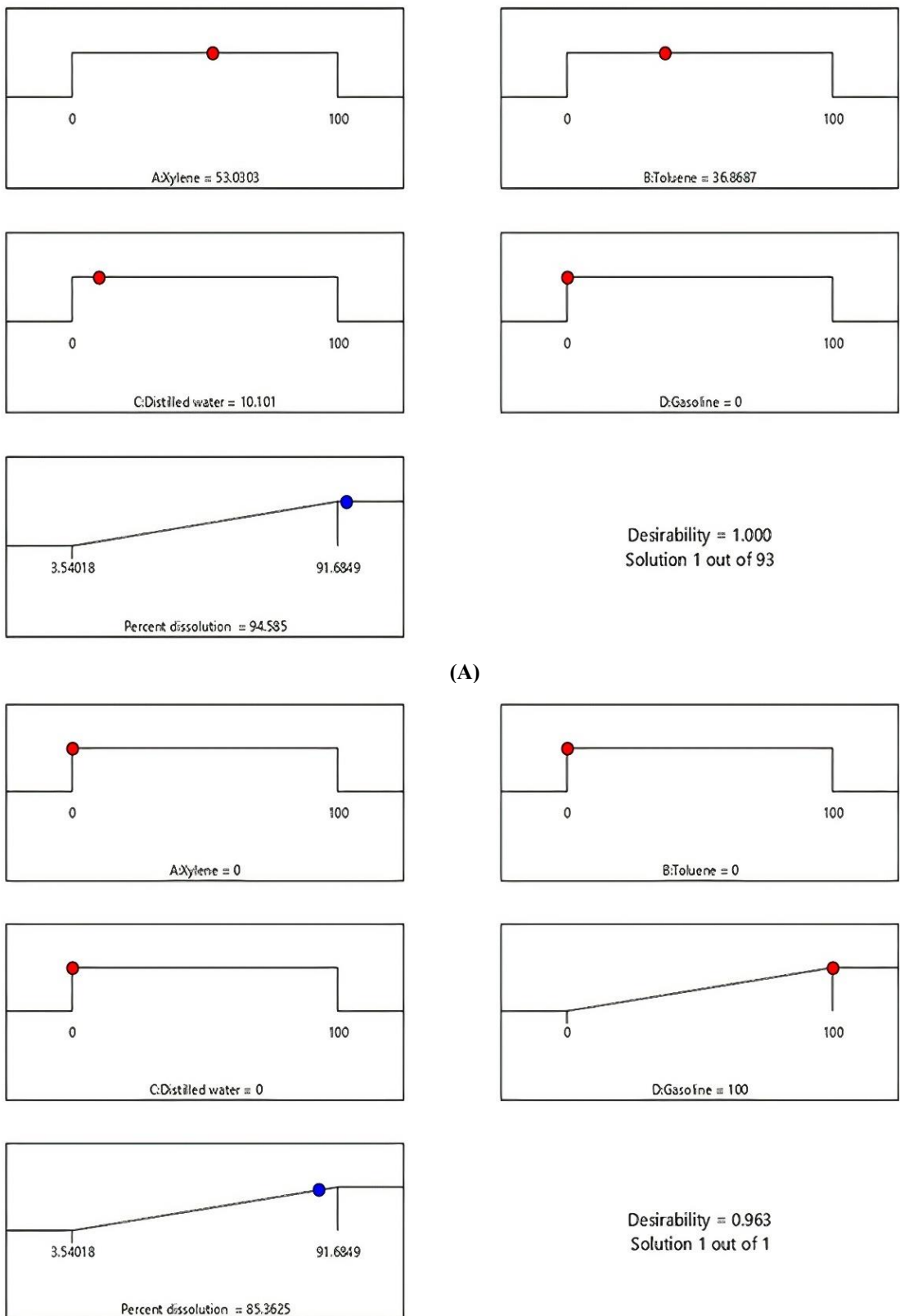
معنادار نبود و مدل فاقد نويز بود. افزايش ترم‌ها، قدرت پیش‌بینی مدل را افزایش داد. با استفاده از مدل، بهینه‌سازی برای شناسایی نسبت‌های حجمی جدید به منظور یافتن مخلوط‌های بهینه برای انحلال کامپوزیت Al-PE انجام شد. مدل بالاترین میزان انحلال (۹۵ درصد) را با نسبت زایلن:تولون:آب (۱۰:۳۷:۵۳ حجم/حجم) پیش‌بینی کرد، در حالی که برای دستیابی به بالاترین درصد انحلال و در عین حال حفظ ترکیب حجمی حلال‌ها در محدوده داده شده، محدودیت اعمال شد (شکل A A). از آنجایی که عامل محدودکننده در بسیاری از عملیات

جدول ۸- آنالیز واریانس مدل پیشنهادی.

Table 8. Analysis of variance of the proposed model.

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	
Model	7115.14	8	889.39	137.22	< 0.0001	significant
Linear Mixture	4962.30	3	1654.10	255.21	< 0.0001	
AC	1013.56	1	1013.56	156.38	< 0.0001	
AD	1.11	1	1.11	0.1712	0.6888	
BC	996.60	1	996.60	153.76	< 0.0001	
CD	794.36	1	794.36	122.56	< 0.0001	
ACD	142.35	1	142.35	21.96	0.0011	
Residual	58.33	9	6.48			
Lack of Fit	54.76	6	9.13	7.68	0.0614	not significant
Pure Error	3.57	3	1.19			
Cor Total	7173.47	17	Mean square	F-value	p-value	





شکل ۸- (A) بالاترین انحلال و (B) ارزانتترین انحلال شناسایی شده برای بازیافت پلی اتیلن کارتن‌های آسپتیک.

Fig. 8- (A) The highest dissolution and (B) the cheapest dissolution identified for recycling polyethylene from aseptic cartons.

## استفاده از بنزین به عنوان یک حلال ارزان و در

### دسترس

معمولاً بنزین حاوی هیدروکربن‌های آروماتیک از جمله زایلن و تولوئن به عنوان بخشی از ترکیبات خود می‌باشد. این ترکیبات آروماتیک، شامل اجزای BTEX، به طور شناخته شده‌ای قادر به حل کردن LDPE هستند (Şahin and Karaboyacı 2021b). نکته مهم این است که شواهدی وجود دارد مبنی بر این‌که اجزای دیگر بنزین، همچون آلیفاتیک‌ها نیز می‌توانند در انحلال پلیمر موثر واقع شوند (Miller-Chou and Koenig 2003; Bláhová and Myrta 2017). به عبارت دیگر، هنگامی که از بنزین به عنوان حلال استفاده می‌شود، اجزای گوناگون، نه تنها ترکیبات BTEX، در قدرت آن برای حل کردن کامپوزیت‌های AI-PE نقش دارند. از آنجایی که در این مطالعه از دو نمونه متفاوت بنزین استفاده شده که منجر به درصد‌های انحلال کمی متفاوت می‌گردد، ترکیب مولکولی بنزین‌ها می‌تواند بینشی در مورد اجزایی که به فرآیند انحلال کمک می‌کنند، ارائه دهد.

بنابراین، اگرچه بنزین برای استفاده به عنوان یک حلال برای کاربردهای صنعتی خاص طراحی نگردیده است، اما احتمال می‌رود برای وظایفی که نیازمند پردازش دقیق نیستند، مانند بازیافت کارتن‌های آسپتیک مناسب باشد.

### نتیجه‌گیری

ظروف آسپتیک (تتراپک)، بسته‌بندی‌های چندلایه‌ای هستند که در صنعت غذایی به‌طور گسترده استفاده می‌شوند و با حفظ کیفیت و طعم محتویات، حمل و نقل و نگهداری آن‌ها را تسهیل می‌کنند. با وجود مزایای این ظروف، بازیافت آن‌ها به دلیل ساختار پیچیده و ترکیبی، چالش بزرگی است و در بسیاری از کشورهای در حال توسعه نرخ بازیافت این بسته‌بندی‌ها ممکن است به صفر نزدیک باشد. حتی در کشورهای صنعتی نیز این نرخ

به‌ندرت از ۵۰٪ بیشتر می‌شود. در این مطالعه، تلاش شده است تا روش‌های بازیافت مؤثرتر برای جداسازی آلومینیوم و پلی‌اتیلن از کامپوزیت‌های AI-PE مورد استفاده در ظروف آسپتیک شناسایی شود. نتایج نشان داد که زایلن و تولوئن به عنوان حلال‌های مؤثر در انحلال پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE) شناسایی شدند و افزودن آب به این حلال‌ها می‌تواند درصد انحلال پلی‌اتیلن را افزایش دهد. به‌ویژه ترکیب بهینه زایلن، تولوئن و آب به نسبت ۳۷:۳۷:۱۰ حجمی، توانست به ۹۵٪ انحلال LDPE دست یابد. علاوه بر این، بنزین به عنوان یک حلال ارزان و در دسترس با غلظت بالای ترکیبات BTEX، به عنوان یک جایگزین مناسب برای بازیافت ظروف آسپتیک معرفی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بنزین می‌تواند تا ۸۵٪ پلی‌اتیلن را حل کند. مزیت اصلی بنزین، در دسترس بودن و هزینه پایین آن است که می‌تواند به صرفه‌جویی‌های اقتصادی در فرآیندهای بازیافت صنعتی کمک کند، به‌ویژه در مناطقی که دسترسی به حلال‌های تخصصی گران یا کمیاب است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از بنزین به عنوان یک حلال اقتصادی می‌تواند راه‌حلی مقرون به صرفه برای بهبود فرآیند بازیافت ظروف آسپتیک و افزایش نرخ بازیافت این بسته‌بندی‌ها در سطح صنعتی باشد.

### سپاسگزاری

نویسندگان از دکتر بغدادی از دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، برای تشویق و مشاوره سازنده ایشان تشکر می‌کنند.

### اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای ندارند که می‌توانسته بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد.

## References

- Abreu, Mario. 1999. "Recycling of Tetra Pak Aseptic Cartons." *Tetra Pak Canada Inc.* 39(6): 6. <https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/0/articles/2268/tetrapak.pdf>
- ATSDR. 1990. "CHEMICAL IDENTITY Gasoline Is a Refined Product of Petroleum." <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp72-c3.pdf>
- Bláhová, Lenka, and Małgorzata Myrta. 2017. "Separation of Beverage Cartons Layers." *Inżynieria Mineralna* 2017(1): 189–94. <https://bibliotekanauki.pl/articles/318708.pdf>
- Cervantes-Reyes, Alejandro et al. 2015. "Solvent Effect in the Polyethylene Recovery from Multilayer Postconsumer Aseptic Packaging." *Waste Management* 38(1): 61–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.034>
- Collins, Chris D. 2007. "Implementing Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons." *Phytoremediation: methods and reviews*: 99–108. [https://doi.org/10.1007/978-1-59745-098-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-59745-098-0_8)
- Dave, Ayush, and Sivamohan N. Reddy. 2023. "Solvothelmal Liquefaction of Tetra Pak Waste into Biofuels and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Carbon Nanocomposite." *Waste Management* 171: 642–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.013>
- "Fuels - Boiling Points." 2005. *Engineering ToolBox*. [https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-boiling-point-d\\_936.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-boiling-point-d_936.html)
- Georgiopoulou, Ioulia, Georgia D. Pappa, Stamatina N. Vouyiouka, and Kostis Magoulas. 2021. "Recycling of Post-Consumer Multilayer Tetra Pak® Packaging with the Selective Dissolution-Precipitation Process." *Resources, Conservation and Recycling* 165: 105268. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105268>
- Van Gheluwe, Louise, Igor Chourpa, Coline Gaigne, and Emilie Munnier. 2021. "Polymer-Based Smart Drug Delivery Systems for Skin Application and Demonstration of Stimuli-Responsiveness." *Polymers* 13(8): 1285. <https://doi.org/10.3390/polym13081285>
- Hidalgo, M. 2011. "Manufacturing Rigid Board by Packaging Waste Containing Aluminum and Polyethylene." *Journal of Scientific and Industrial Research* 70(3): 232–34. <http://red.uao.edu.co/handle/10614/11905>
- Korkmaz, Ahmet, Jale Yanik, Mihai Brebu, and Cornelia Vasile. 2009. "Pyrolysis of the Tetra Pak." *Waste Management* 29(11): 2836–41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.07.008>
- Kostecka, Keith S, Ashraf Rabah, and Charles F Palmer Jr. 1995. "GC/MS Analysis of the Aromatic Composition of Gasoline." *Journal of chemical education* 72(9): 853. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed072p853>
- Kumar, G. Sanjay, V. Ravi Kumar, and Giridhar Madras. 2002. "Continuous Distribution Kinetics for the Thermal Degradation of LDPE in Solution." *Journal of Applied Polymer Science* 84(4): 681–90. <https://doi.org/10.1002/app.2344>
- Li, Houqian et al. 2022. "Expanding Plastics Recycling Technologies: Chemical Aspects, Technology Status and Challenges." *Green Chemistry* 24(23): 8899–9002. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2011/g6/d2gc02588d>
- Lopes, Cristina M.A., and Maria Isabel Felisberti. 2006. "Composite of Low-Density Polyethylene and Aluminum Obtained from the Recycling of Postconsumer Aseptic Packaging." *Journal of Applied Polymer Science* 101(5): 3183–91. <https://doi.org/10.1002/app.23406>
- Miller-Chou, Beth A., and Jack L. Koenig. 2003. "A Review of Polymer Dissolution." *Progress in Polymer Science (Oxford)* 28(8): 1223–70. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(03\)00045-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(03)00045-5)
- Robertson, Gordon L. 2021. "Recycling of Aseptic Beverage Cartons: A Review." *Recycling* 6(1): 20. <https://doi.org/10.3390/recycling6010020>
- Rodríguez-Gómez, J. E. et al. 2015. "Development of a Process Using Waste Vegetable Oil for Separation of Aluminum and Polyethylene from Tetra Pak." *Fuel* 149: 90–94. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.032>
- Şahin, Güzde Gizem, and Mustafa Karaboyacı. 2021a. "Process and Machinery Design for the Recycling of Tetra Pak Components." *Journal of Cleaner Production* 323(1): 126–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129186>
- . 2021b. "Process and Machinery Design for the Recycling of Tetra Pak Components." *Journal of Cleaner Production* 323: 129186.
- Samori, Chiara et al. 2023. "Recycling of Multilayer Packaging Waste with Sustainable Solvents." *Resources, Conservation and Recycling* 190: 106832. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106832>
- Šleiniūtė, Agnė et al. 2024. "Mechanical Properties of Polymers Recovered from Multilayer Food Packaging by Nitric Acid." *Sustainability* 16(5): 2106. <https://doi.org/10.3390/su16052106>
- Tamizhdurai, P et al. 2024. "A State-of-the-Art Review of Multilayer Packaging Recycling: Challenges, Alternatives, and Outlook." *Journal of Cleaner Production* 447: 141403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141403>

Tomaszewska, Karina, Joanna Kałuzna-Czaplińska, and Wojciech Józwiak. 2010. "Thermal and Thermo-Catalytic Degradation of Polyolefins as a Simple and Efficient Method of Landfill Clearing." *Polish Journal of Chemical Technology* 12(3): 50–57. <http://dx.doi.org/10.2478/v10026-010-0034-x>

Varžinskas, Visvaldas, Jurgis K. Staniškis, and Milda Knašyte. 2012. "Decision-Making Support System Based on LCA for Aseptic Packaging Recycling." *Waste Management and Research* 30(9): 931–39. <https://doi.org/10.1177/0734242X12448519>

Yan, Dahai et al. 2015. "Optimizing and Developing a Continuous Separation System for the Wet Process Separation of Aluminum and Polyethylene in Aseptic Composite Packaging Waste." *Waste Management* 35: 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.008>

Zawadiak, Jan. 2017. "Tetra Pak Recycling – Current Trends and New Developments." *American Journal of Chemical Engineering* 5(3): 37. <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajche>

Zhang, Ji Fei, Da Hai Yan, and Zhong He Li. 2009. "The Recycling of the Tetra-Pak Packages: Tesearch on the Wet Process Separation Conditions of Aluminum and Polythene in the Tetra-Pak Packages." In 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE 2009, IEEE, 1–6. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5163649>

