

Chemical Recycling of Flexible Polyurethane Foam Scraps Using Ricinoleic Acid as a Bio-Based Acidolysis and Glycolysis Agent

Ismail Omrani¹, Reza Mohammadi Berenjegani¹

1- Department of Polyurethane and Advanced Materials, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

Abstract

Annually, millions of tons of flexible polyurethane foam (PUF) are produced for a variety of applications. The large-scale production and disposal of PUF pose significant environmental challenges. Although reprocessing is employed as a strategy to mitigate PUF waste, flexible PUFs are frequently subjected to incineration or landfill disposal, thereby exacerbating environmental concerns. Acidolysis and glycolysis are recognized as effective industrial methods for recycling waste generated from PUF. This study presents a sustainable and cost-effective approach for the chemical recycling of flexible PUF waste. Ricinoleic acid, derived from castor oil, is utilized as a long-chain carboxylic acid to investigate the influence of dangling side chains and molecular weight on the acidolysis of PUF. The synthesized carboxylic acid functions as a bio-based, renewable, and environmentally friendly agent. Through the reaction with carboxylic acid, thermoset PUF is effectively converted into smaller molecules and oligomers that contain hydroxyl groups. The chemical structure of the recycled polyol was characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR), and gel permeation chromatography (GPC). The resulting recycled polyol (RP) demonstrates desirable industrial properties, including hydroxyl number, acid number, and viscosity, rendering it suitable for the production of flexible PUF. Moreover, the recycled polyol with an acid number of 2.5 mgKOH/g and a hydroxyl number of 38 mgKOH/g can replace up to 30% of the virgin polyol in the production of flexible PUF without compromising the mechanical properties of rigid polyurethane foams, thereby meeting commercial standards.

Keywords

Polyurethane foam, Acidolysis, Glycolysis, Recycled Polyol, Ricinoleic acid

Article history:

Received: 10-10-2026

Accepted: 06-01-2026

Corresponding author:

*i.omrani@ippi.ac.ir

بازیافت شیمیایی ضایعات فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر با استفاده از ریسینولئیک اسید به‌عنوان یک عامل زیستی اسیدولیز و گلیکولیز

اسماعیل عمرانی*، رضا محمدی برنجگانی^۱

۱- گروه پلی‌یورتان و مواد پیشرفته، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

سالانه میلیون‌ها تن فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر (PUF) برای کاربردهای متنوع تولید می‌شود. تولید در مقیاس بزرگ و دفع PUF چالش‌های زیست‌محیطی قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. درحالی‌که اتصال مجدد به‌عنوان یک استراتژی برای کاهش ضایعات PUF مورد استفاده قرار می‌گیرد، PUFهای انعطاف‌پذیر اغلب در معرض سوزاندن یا دفن زباله قرار می‌گیرند و در نتیجه نگرانی‌های زیست‌محیطی را تشدید می‌کنند. اسیدولیز و گلیکولیز به‌عنوان رویکرد صنعتی مناسب برای بازیافت ضایعات تولید شده از PUF به رسمیت شناخته می‌شوند که این مطالعه یک رویکرد پایدار و مقرون‌به‌صرفه را برای بازیافت شیمیایی ضایعات PUF انعطاف‌پذیر معرفی می‌کند. ریسینولئیک اسید، از روغن کرچک مشتق شده است و به‌عنوان یک کربوکسیلیک اسید با زنجیره بلند، برای بررسی اثرات زنجیره‌های جانبی آویزان و وزن مولکولی بر اسیدولیز PUF استفاده شد. کربوکسیلیک اسید سنتز شده به‌عنوان یک عامل زیست‌پایه، تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست عمل کرد. PUF گرماسخت به طور مؤثری از طریق واکنش کربوکسیلیک اسید به مولکول‌های کوچک‌تر و الیگومرهای حاوی گروه‌های هیدروکسیل تبدیل شد. ساختار شیمیایی پلی‌ال بازیافتی با استفاده از طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و کروماتوگرافی ژل تراوایی (GPC) شناسایی شد. پلی‌ال بازیافتی (RP) به‌دست‌آمده خواص صنعتی مطلوبی از جمله عدد هیدروکسیل، عدد اسیدی و گرانیوی را نشان داد که آنها را برای تولید PUF انعطاف‌پذیر مناسب کرد. پلی‌ال بازیافتی با عدد اسیدی $2/5 \text{ mg KOH/g}$ و عدد هیدروکسیل 38 mg KOH/g توانست تا ۳۰٪ از پلی‌ال خام را در تولید PUF انعطاف‌پذیر بدون افت خواص مکانیکی فوم‌های پلی‌یورتان سخت جایگزین کند و در نتیجه استانداردهای تجاری را برآورده کند.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۰/۱۶

فوم پلی‌یورتان، اسیدولیز، گلیکولیز، پلی‌ال بازیافتی، ریسینولئیک اسید

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

پلی یورتان ها پنجمین پلیمر مصرف جهان هستند که از واکنش بین پلی ال ها و ایزوسیانات ها ساخته می شوند [۱، ۲]. این پلیمرها به دلیل تنوع بالای پلی ال ها و ایزوسیانات ها، امکان سنتز ترکیبات مختلف و همچنین به دلیل ویژگی هایی مانند صرفه جویی در انرژی، قیمت مناسب و دوام بالا کاربردهای گسترده ای در صنایع مختلف مانند ساختمان، خودرو و لوازم خانگی دارند [۳-۶]. پلی یورتان ها می توانند در قالب های مختلف از جمله چسب، رنگ، فوم و مواردی از این قبیل عرضه شوند که در این بین بیشترین مصرف جهانی آنها مربوط به فوم ها می باشد [۷]. فوم های پلی یورتان (PUF) براساس چگالی، ساختار سلولی و کاربرد به دو دسته کلی PUF های انعطاف پذیر و PUF های سخت تقسیم می شوند. PUF های انعطاف پذیر دارای چگالی پایین و ساختار سلول باز هستند و مناسب استفاده در تشک ها و صندلی خودرو ها می باشند که سالانه حجم بالایی از تولید صنعتی مواد پلی یورتان را به خود اختصاص داده اند [۸]. اکثر PUF های انعطاف پذیر تجاری از پلی پروپیلن گلیکول (PPG) و ایزوسیانات های آروماتیک ساخته می شوند [۹، ۱۰]. PPG و ایزوسیانات های آروماتیک در برابر تخریب مقاومت می کنند و PUF های انعطاف پذیر برای سال ها در محیط باقی می مانند [۱۱]. به دلیل ساختار گرماسخت PUF های انعطاف پذیر، فرآوری مجدد محلول یا مذاب آن غیرممکن است. اگرچه اتصال مجدد یک روش اصلی برای ضایعات PUF است، اما PUF های انعطاف پذیر اغلب سوزانده یا دفن می شوند [۱۲]. صنعتگران، روش های متداول برای دفع پلی یورتان را به سه دسته دفن، سوزاندن و بازیافت تقسیم می کنند [۱۳]. مصرف بی رویه مواد پلیمری باعث آلودگی زمین شده و زندگی را برای بشریت غیرممکن می کند [۱۴]. اثرات زیست محیطی ضایعات PUF در آینده قابل توجه تر خواهد بود و باید از دفن ضایعات و سوزاندن آنها اجتناب شود [۱۵]. دانشمندان و محققان صنعتی توجه زیادی به بازیافت شیمیایی PUF ها، مانند سایر پلیمرها، با پیروی از اصل تجزیه زنجیره ای داشته اند [۱۶-۲۰].

فناوری بازیافت شیمیایی شامل روش های گلیکولیز، اسیدولیز، هیدرولیز و آمینولیز می باشد [۲۱-۲۷]. به طور معمول، PUF های انعطاف پذیر به تدریج به پلی ال با ساختار PPG و سایر مولکول های کوچک تبدیل می شوند [۱۳]. در هیدرولیز، پیوندهای یورتان در PUF ها با بخار بیش از حد گرم شده به پلی ال و آمین تجزیه می شوند. پس از خلص سازی، پلی ال در فرمول پلی یورتان قابل استفاده می باشد [۲۳]. در آمینولیز، پیوندهای یورتان در PUF ها با واکنش تبادل آمین و هیدروکسیل با استفاده از یک دی آمین

آلیفاتیک تجزیه می شوند و پلی ال ها و اوردهای جایگزین شده تولید می شوند [۲۸-۳۱]. پیوندهای اوره در ساختار پلی ال بازیافتی منجر به پیوند هیدروژنی درون مولکولی بیشتر و گرانشی بالا می شوند که قابلیت استفاده مجدد پلی ال بازیافتی را محدود می کنند [۳۲، ۳۳].

در بازیافت شیمیایی به روش گلیکولیز طی یک واکنش ترانس استریفیکاسیون، پیوندهای یورتان می شکنند و پلی ال های بازیافتی شده تولید می شوند. این واکنش در شرایط دمایی حدود ۱۸۰-۲۲۰ درجه سانتیگراد انجام می شود [۱۳]. در اسیدولیز، از دی کربوکسیلیک اسید به عنوان عامل شکاف در حدود ۲۰۰°C استفاده می شود [۳۴، ۳۵]. دی کربوکسیلیک اسید با گروه عاملی یورتان واکنش می دهد و آن را به گروه های عاملی آمید و دی اکسید کربن تبدیل می کند [۳۶]. امروزه فناوری اسیدولیز در دنیا صنعتی شده است و صنعتگران با استفاده از دانش و فناوری روز، تبدیل شیمیایی ضایعات PUF انعطاف پذیر به پلی ال های جدید را آغاز کردند [۳۷]. دی کربوکسیلیک اسید های آلیفاتیک، اتصال عرضی PUF ها را در یک محیط پلی ال خام دیپلمریزه می کنند. گروه های یورتان در زنجیره پلیمری به گروه های هیدروکسیل الکلی و کربن دی اکسید (CO₂) تبدیل می شوند. مقدار جایگزینی پلی ال بازیافتی برای پلی ال خام تنها می تواند به ۳۰٪ یا کمتر در فرمولاسیون برسد. به نظر می رسد جداسازی محصول و کیفیت پلی ال از موانع اصلی توسعه این فناوری باشد [۳۸، ۳۹].

Seok و همکارانش بازیافت شیمیایی فوم پلی یورتان انعطاف پذیر ضایعاتی صندلی خودرو را از طریق روش گلیکولیز با استفاده از گلیکول های با وزن مولکولی مختلف و پتاسیم هیدروکسید به عنوان کاتالیزور بررسی کردند و مشخص شد که غلظت های بالاتر کاتالیزور (مقدار بهینه در ۰/۱ درصد وزنی) نرخ تبدیل را افزایش می دهد و افزایش وزن مولکولی عوامل گلیکولیز، محصولات را از فاز تقسیم شده به تک فاز تغییر می دهد [۴۰]. Liu و همکارانش یک واکنش اسیدولیز PUF با مالئیک اسید را بررسی کردند که در کمتر از ۱۵ دقیقه در دمای ۱۷۵ درجه سانتی گراد تحت جو نیتروژن بدون حلال کامل شد و منجر به تخریب کامل PUF به پلی ال بازیافتی گردید [۴۱]. He و همکارانش اسیدولیز ضایعات PUF را برای بهبود تخریب و کیفیت پلی ال بازیافتی مورد مطالعه قرار دادند. آنها از ضایعات فوم تجاری استفاده کردند، آن را با سوکسینیک اسید دیپلمریزه کردند، کاتالیزورهای مبتنی بر زینک را آزمایش کردند و Zn(OAc)₂ را به عنوان بهترین کاتالیزور برای ساخت فوم جدید انتخاب کردند [۴۲]. در مطالعه دیگر Godinho و همکارانش انواع مختلف ضایعات PUF را که از طریق اسیدولیز

شرکت شیمیایی Akshar هند خریداری شد. اتیل استات، تولوئن، روی استات و دی اتانول آمین از شرکت شیمیایی Merck آلمان خریداری شد. Wanol F3160 و Wanol F2140P (مشخصات شیمیایی شرح داده شده در جدول ۱) و Wannate 8018 با مقدار NCO معادل ۲۶٪ از شرکت شیمیایی Wanhua چین خریداری شدند. پلی ال VORANOL™ CP ۱۴۲۱ از شرکت شیمیایی DOW به عنوان یک بازکننده سلول استفاده شد. DABCO® 33 LV به عنوان یک ژل کاتالیست، DABCO® BL 11 به عنوان یک کاتالیزور فوم زا و Tegostab BF2370 به عنوان یک ماده فعال سطحی سیلیکونی از شرکت شیمیایی Evonik تهیه شد.

۲-۲- شناسایی

عدد هیدروکسیل، عدد اسیدی و میزان آب پلی ال سنتز شده به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D4274، D664 و D2216 تعیین شد. طیف 1H-NMR در CDCl₃ به عنوان حلال در دستگاه Bruker Avance 400-MHz ثبت شد. طیف فرسرخ از $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ با استفاده از دستگاه Bruker IFS 48 FT-IR با استفاده از KBr ثبت شد. گرانروی پلی ال با استفاده از ویسکومتر DVII (بروکفیلد، آلمان) مطابق با استاندارد ISO 2555 تعیین شد. چگالی ظاهری PUF ها بر اساس استاندارد ASTM D1622 تعیین شد. مورفولوژی PUF ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) Tescanveg II از جمهوری چک تعیین شد. نمونه ها تحت ولتاژ شتاب دهنده ۲۰ kV و بزرگنمایی ۲ mm اسکن شدند. تجزیه و تحلیل آماری توزیع اندازه سلول های PUF با استفاده از نرم افزار Image J و تصاویر SEM محاسبه شد. برای به دست آوردن خواص مکانیکی PUF ها از دستگاه تست مکانیکی (سنتام، ایران) استفاده شد. ابزار کروماتوگرافی ژل تراوایی (GPC)

با استفاده از سوکسینیک اسید دپلمریزه شدند، مورد مطالعه قرار دادند. آنها خواص پلی ال های بازیافتی را تعیین و مقایسه کردند و یک پوشش پلی یورتان بدون حلال تولید کردند [۴۳]. در مطالعه دیگری آنها یک چسب پلی یورتان مشتق شده از پلی ال بازیافتی که از طریق اسیدولیز ضایعات پلی یورتان با استفاده از دی اسیدهای مختلف (اسیدهای دی کربوکسیلیک سوکسینیک و فتالیک) به دست می آید، تولید کردند [۴۴].

این مطالعه بر روی بازیافت ضایعات PUF انعطاف پذیر با استفاده از دی کربوکسیلیک اسید با زنجیره های آویزان زیست پایه برای ایجاد یک روش سنتز سازگار با محیط زیست متمرکز شده است. هدف این رویکرد کاهش آلودگی محیطی، افزایش نرخ پلیمریزاسیون PUF های انعطاف پذیر و بهبود کیفیت پلی ال بازیافتی با کاهش گرانروی است. در این رابطه، ضایعات تجاری PUF انعطاف پذیر از طریق ریسینولیک اسید سنتز شده از روغن کرچک به عنوان یک بستر و عامل اسیدولیز و گلیکولیز زیست پایه تجزیه شدند. ریسینولیک اسید به دلیل ماهیت مایع و زنجیره آویزانی که دارد انتخاب شد که واکنش بدون پلی ال خام را در حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد امکان پذیر می کند. پیشرفت واکنش با تعیین عدد هیدروکسیل (OHV)، عدد اسیدی (AN)، و گرانروی پلی ال بازیافتی دنبال شد. پس از آن، پلی ال بازیافتی با پلی ال خام برای تولید فوم های انعطاف پذیر جایگزین شد که به طور گسترده مورد شناسایی قرار گرفت.

۲- تجربی

۲-۱- مواد

ضایعات PUF انعطاف پذیر بر پایه تولوئن دی ایزوسیانات (TDI) با چگالی تقریبی 28 Kg.m^{-3} با متوسط اندازه ذرات 1 cm^3 که از تولیدکنندگان صنعتی بازار داخلی کشور تهیه شد. روغن کرچک از

جدول ۱. مشخصات پلی اتر های مرسوم مورد استفاده در فرمولاسیون PUF بر پایه MDI.

Table 1. Characteristics of common polyethers used in MDI-based PUF formulations.

Molecular mass (g/mol)	Viscosity at 25°C (mPa.s)	Hydroxyl number (mg KOH/g)	Water content (%)	Polyether Polyol
6000	1000-1400	26-29	0.05	Wanol F3160
7000	5000-5500	20-22	0.1	Wanol F2140P
5000	1300-1320	33-34	0.08	Voranol CP1421

Agilent 1100، برای ارزیابی وزن و توزیع مولکولی تحت سرعت جریان 1/0 mL/min با استفاده از حلال THF استفاده شد.

۲-۳- سنتز ریسینولیک اسید (RA) از روغن کرچک

ریسینولیک اسید از هیدرولیز روغن کرچک سنتز شد. 250 g روغن کرچک و محلول (160 g KOH در 500 ml اتانول) در یک بالن سه دهانه شارژ شد. مخلوط به مدت 2 ساعت رفلکس شد و سپس اتانول تبخیر و جدا شد. مخلوط در 300 ml اتیل استات حل شد و 400 ml آب مقطر به آن اضافه شد. محلول مایل به زرد شفاف با HCl (37٪) اسیدی شد تا به pH حدودی 2 برسد. لایه آلی جدا شد و با استفاده از منیزیم سولفات خشک شد. محلول صاف شد و با عملیات تبخیر خشک شد. RA به صورت مایع شفاف و چسناک زرد رنگ با عدد اسیدی 175 mgKOH/g به دست آمد.

۲-۴- بازیافت شیمیایی ضایعات PUF با استفاده از RA به عنوان عامل بازیافت

ضایعات PUF با متوسط اندازه ذرات 1-2 cm³ توسط ماکرو اسید سنتز شده به عنوان یک عامل اسیدولیز و استات روی به عنوان یک کاتالیزور از طریق روش زیر پلیمریزه شد. بازیافت PUF در محیط عاری از پلی ال خام انجام شد. یک راکتور شیشه‌ای به حجم 1 ml تحت جو نیتروژن، با حضور سیستم گرمایش، کندانسور، گیرنده و دستگاه‌های همزن مکانیکی با مقدار مناسبی از RA (نسبت وزنی 1:1 برای RA و PUF) بارگذاری شد. کاتالیزور

استات روی (1٪ از جرم PUFها) به راکتور اضافه شد. دمای راکتور به 200°C افزایش یافت. ضایعات PUF به طور مداوم با نرخ حدودی 50-40 گرم در دقیقه به راکتور اضافه شدند. پس از تکمیل افزودن PUF به راکتور، واکنش به مدت 14 ساعت در دمای 200-205°C تحت جو نیتروژن ادامه یافت. مخلوط واکنش تا 120°C خنک شد و با استفاده از کاغذ صافی از قیف بوختر عبور داده شد تا نهایتاً پلی ال بازیافتی (RP) به دست آمد.

۲-۵- تهیه فوم پلی یورتان انعطاف پذیر بازیابی شده (RPUF)

فرمولاسیون PUF بر اساس روش‌های استاندارد تولید صنعتی انجام شد (جدول 2). در آزمایش‌های بازیافت، پلی ال خام با RP جایگزین شد. در یک روش مرسوم، تهیه یکی از نمونه‌ها به شرح زیر است:

20 g RP، 60 g پلی ال خام (Wanof F 3160)، 13/38 پلیمر پلی ال (Wanof F2140P)، 2 g H₂O به عنوان عامل فوم زای شیمیایی، 1/8 سیلیکون فعال سطحی (Tegostab BF2370)، 33 LV DABCO® g1 به عنوان ژل کاتالیست، 0/5 دی اتانول آمین به عنوان اتصال دهنده عرضی، 1/2 g VORANOL™ CP 1421 به عنوان بازکننده سلول و 0/12 g DABCO® BL 11 به عنوان کاتالیزور فوم زا در یک لیوان پلاستیکی قرار داده شده است. از یک همزن با سرعت بالا استفاده شد تا با سرعت 2000 دور در دقیقه به مدت 20 ثانیه هم زده شود تا پراکندگی یکنواختی

جدول 2. فرمول فوم مبتنی بر MDI با استفاده از RP (مقادیر به صورت "قسمت در پلی ال" (ppp; w/w) آورده شده است).

Table 2. MDI-based foam formulation using RP (values are given as "parts per polyol" (ppp; w/w)).

Sample	RP	Wanof F3160	Wanof F2140P	Additions	Wannate8018
Pure Sample	0	80	13.38	6.62	60
PUF-RP-10	10	70	13.38	6.62	62
PUF-RP-20	20	60	13.38	6.62	64
PUF-RP-30	30	50	13.38	6.62	65
PUF-RP-40	40	40	13.38	6.62	67
PUF-RP-50	50	30	13.38	6.62	70

می‌شود و پیک شناسایی شده $5/23$ ppm مربوط به پروتون متین متصل به اکسیژن در گروه‌های استری (-R₂CH-OCO-) است. با هیدرولیز روغن کرچک، این پیک‌ها از طیف ¹H-NMR ماده RA حذف شدند (شکل ۲ الف)). همان‌طور که در شکل ۱ (ب) و شکل ۲ (ب) نشان داده شده است، تبدیل موفقیت آمیز روغن کرچک به RA توسط FTIR تایید شد. پیک گروه‌های کربوکسیلیک اسید بسیار شدید و پهن بودند و محدوده وسیعی بین 2800 تا 3500 cm^{-1} را برای O-H کششی پوشش دادند. همچنین نزدیکی عدد اسیدی تجربی (172 mg KOH/g) به تئوری (174 mg KOH/g) سنتر RA را تأیید کرد.

۳-۲- اسیدولیز و گلیکولیز PUF با استفاده از ریسینوئیک اسید

ضایعات PUF صنعتی با چگالی متغیر 23 $kg.m^{-3}$ تا 33 $kg.m^{-3}$ و اندازه 1 cm^3 تا 2 cm^3 بر پایه تولوئن دی ایزوسیانات (TDI) و پلی‌اتر پلی‌ال سه‌عاملی با استفاده از RA سنتز شده با زنجیره آویزان زیستی بدون پلی‌ال مرسوم بازیافت شدند. تشکیل گروه‌های آمید و استر در واکنش اسیدولیز و از طرفی وجود این گروه‌های عاملی با پیوند هیدروژنی خود، گرانروی RP

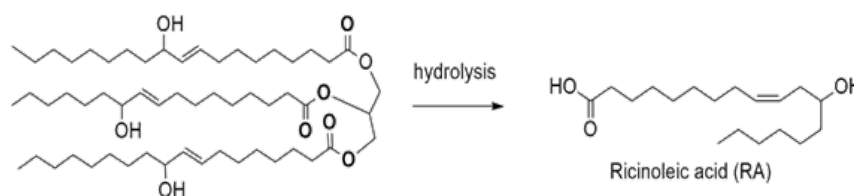
ایجاد شود. نهایتاً مخلوط حاصل با پلی‌ال فرموله شده با نسبت $100:64$ (پلی‌ال فرموله شده: Wannate ۸۰۱۸) با استفاده از همزن با سرعت بالا به مدت ۱۰ ثانیه با دور 2000 هم زده شد و سپس به سرعت داخل قالب ریخته شد. پس از ایجاد فوم، نمونه‌ها به داخل آون با دمای $70^{\circ}C$ منتقل شدند و پس از پخت به مدت ۱۰ دقیقه خارج شدند تا RPUF بدست آید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سنتز ریسینوئیک اسید

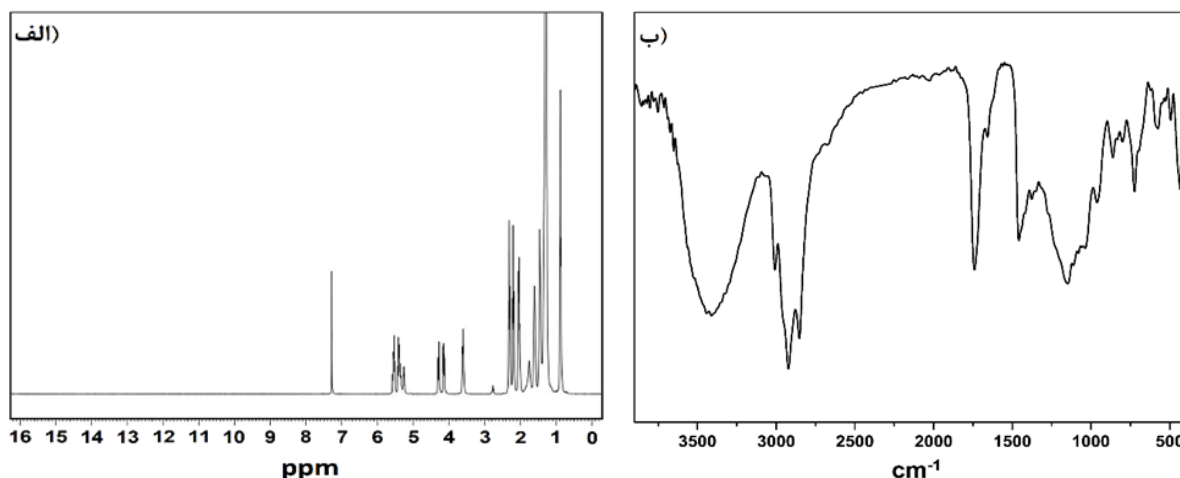
در این مطالعه، کربوکسیلیک اسید با زنجیره‌های کربنی بلند حاوی زنجیره‌های آویزان به‌عنوان واکنش‌دهنده و محیطی برای بازیافت ضایعات PUF با استفاده از فرایند اسیدولیز طراحی شده است. مسیر شیمیایی برای تهیه ریسینوئیک اسید به روش هیدرولیز در طرح‌واره ۱ نشان داده شده است.

آنالیز ¹H-NMR و FTIR تبدیل روغن کرچک به RA را تأیید کردند. همان‌طور که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است، در آنالیز ¹H-NMR روغن کرچک، پیک‌های چندگانه شناسایی شده در محدوده $4/15$ ppm و $4/35$ ppm برای پروتون‌های متیلن متصل به اکسیژن در گروه‌های استری (-CH₂-OCO-) مشاهده



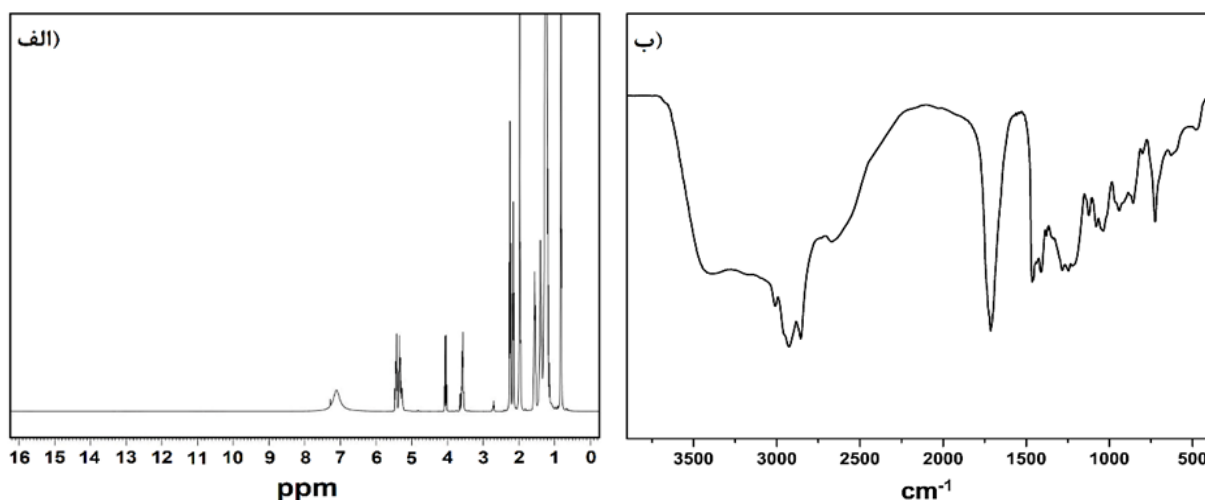
طرح‌واره ۱. مسیر سنتز RA.

Scheme1. RA synthesis pathway.



شکل ۱. الف) طیف ¹H-NMR و ب) طیف FTIR روغن کرچک.

Figure1. a) ¹H-NMR spectrum and, b) FTIR spectrum of castor oil.

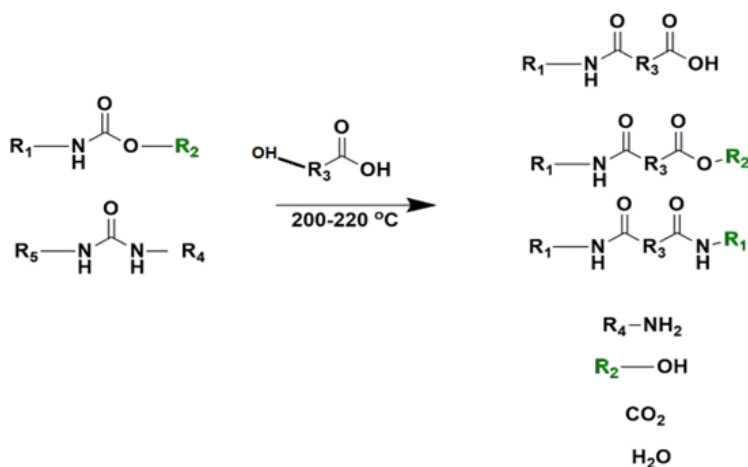


شکل ۲. الف) طیف $^1\text{H-NMR}$ و ب) طیف FTIR ریسینولئیک اسید.

Figure 2. $^1\text{H-NMR}$ spectrum and, b) FTIR spectrum of ricinoleic acid.

شوند (طرح‌واره ۲) [۴۶, ۴۵, ۴۲, ۴۱]. پلی‌ال بازیافتی دارای گروه‌های عاملی استر، آمید، آمین، هیدروکسیل و اسید در ساختار است. ساختار شیمیایی RP توسط آنالیزهای طیف‌سنجی $^1\text{H-NMR}$ و FTIR شناسایی شد. همان‌طور که در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است، اسیدولیز موفقیت آمیز PUF با ظهور پیوندهای آمیدی در حدود 1650 cm^{-1} و یک پیک پهن در محدوده 3500 cm^{-1} مربوط به پیوندهای O-H در ساختار پلی‌ال تایید شد. ظهور یک قله تیز در 2850 cm^{-1} مربوط به متیل در PPG نشان‌دهنده تشکیل پلی‌ال است. پیک افزایشی در ناحیه 3020 cm^{-1} مربوط به آمید تولوئن دی آمین (TDA) و بخش‌های الیگوره است. پیک تیز در محدوده 1700 cm^{-1} به گروه‌های کربونیل که از گروه‌های استری در واکنش اسیدولیز تازه تشکیل شده و گروه‌های استری که از قبل در

را افزایش می‌دهند. هدف این پروژه سنتز کربوکسیلیک اسید با زنجیر آویزان با وزن مولکولی بالا و اختلاط پذیری خوب ضایعات PUF است که منجر به یک فرایند اقتصادی می‌شود که وجود پلی اتر پلی‌ال مرسوم ضروری نیست. همچنین، بازیافت PUF انعطاف‌پذیر با یک جزء زیست‌پایه راه حل امیدوارکننده‌ای برای تولید فوم پلی‌یورتان پایدارتر است. PUF انعطاف‌پذیر بوسیله RA زیست‌پایه سنتز شده (PUF/RA) با نسبت وزنی ۱:۱ در دمای واکنش $200-220^\circ\text{C}$ و زمان واکنش ۱۴ ساعت در حضور روی استات $(\text{Zn}(\text{OAc})_2)$ به‌عنوان کاتالیزور ((نسبت فوم به کاتالیزور ۱ درصد وزنی) دپلمریزه شد. پلی‌ال بازیافتی (RP) محصول واکنش PUFs با RA است. RA زیست‌پایه سنتز شده با پیوندهای یورتان در زنجیره‌های پلیمری واکنش نشان می‌دهد و باعث می‌شود که آنها به تدریج به پلی‌ال‌ها، الیگومرهای مختلف، CO_2 و آب تجزیه



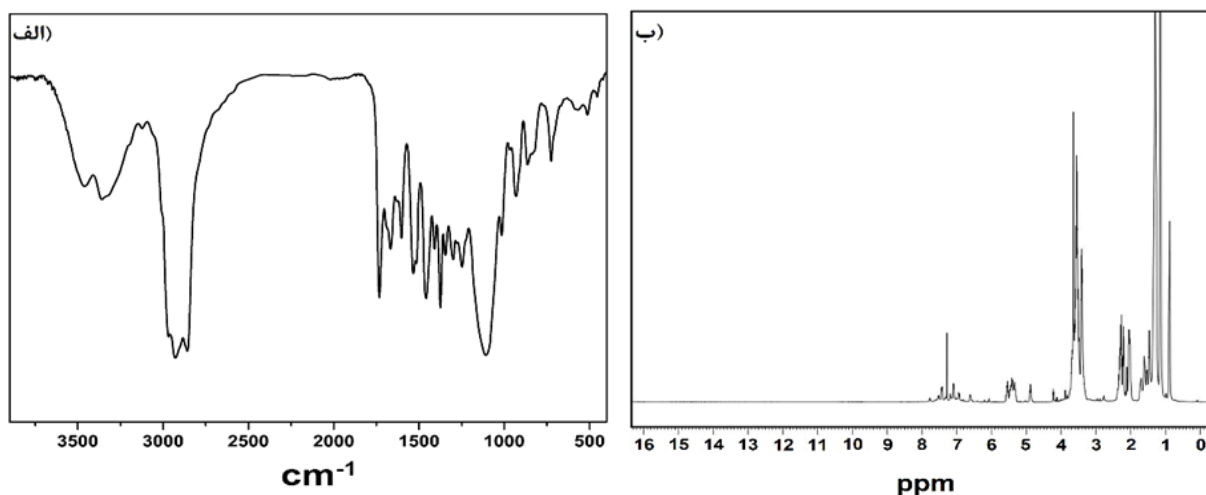
طرح‌واره ۲. مسیر واکنش اسیدولیز RA با پیوندهای یورتان و اوره در PUFهای انعطاف‌پذیر.

Scheme 2. Reaction pathway of RA acidolysis with urethane and urea linkages in flexible PUFs.

طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار GPC نشان دهنده سه قله یا سه نوع توزیع وزن مولکولی است. در حقیقت مخلوط پلی‌ال بازیافتی حاصل واکنش‌های جانبی پلی‌اتری آزاد شده از فوم پلی‌یورتان می‌باشد. برای تهیه فوم منعطف پلی‌یورتان از پلی‌اترها با وزن مولکولی ۳۰۰۰ الی ۵۰۰۰ استفاده می‌شود. به نظر می‌رسد پس از تولید شدن پلی‌اتر گروه‌های هیدروکسیل با گروه‌های کربوکسیلیک اسید ریسنولتیک اسید واکنش داده و وزن مولکولی بالاتر رفته است. در حقیقت با تشکیل استر، وزن مولکولی پلی‌ال‌های بازیافتی افزایش یافته است. پیک ظاهر شده در وزن مولکولی حدود ۱۰۰۰ هم به دایمر شدن خود RA وابسته است. برای تولید فوم پلی‌یورتان از یک پلی‌ال لازم است مشخصات

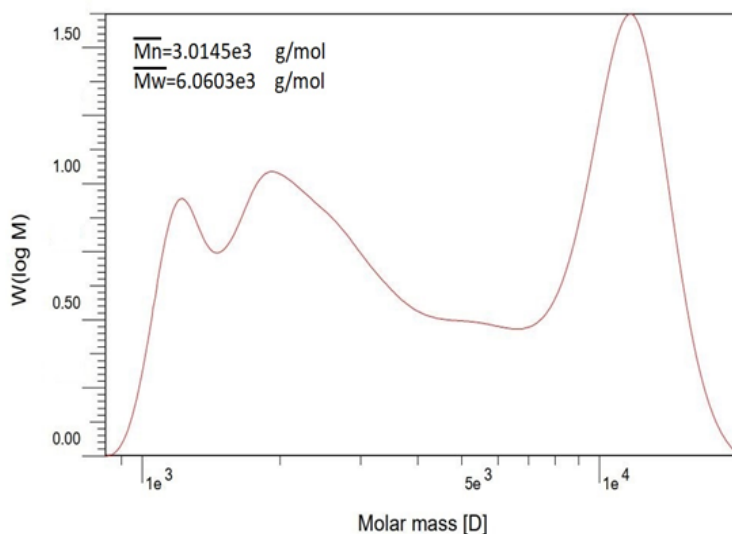
ساختار RA زیست‌پایه موجود بوده مربوط است. شکل ۳ (ب) طیف $^1\text{H-NMR}$ نمونه RP را نشان می‌دهد. پیک‌های تیز افزایشی در محدوده ۱/۲ ppm تا ۱/۵ ppm مربوط به پروتون متیل ($-\text{CH}_3$) و محدوده ۳/۴ ppm تا ۳/۸ ppm مربوط به پروتون‌های متیلن و متیل متصل به گروه‌های اتر ($-\text{CH-O}-$ و $\text{CH}_2\text{-O}-$) است که تشکیل RP (RP مبتنی بر PPG) را تأیید می‌کند. همچنین، TDA آمید دار شده و بخش‌های الیگومره شده در ساختار RP به صورت پیک‌های افزایشی در محدوده ۷/۳ ppm تا ۷/۶ ppm شناسایی شدند.

بخش مهمی از تحقیقات توسط آنالیز GPC، به منظور شناسایی وزن مولکولی (M_w) و شاخص پراکندگی (PDI) پلی‌ال بازیافتی به



شکل ۳. الف) طیف FTIR و ب) طیف $^1\text{H-NMR}$ پلی‌ال بازیافتی.

Figure 3. a) FTIR spectrum and, b) $^1\text{H-NMR}$ spectrum of recycled polyol.



شکل ۴. منحنی GPC پلی‌ال بازیافتی.

Figure 4. GPC curve of recycled polyol.

جدول ۳. مشخصه‌های پلی‌ال بازیافتی (RP).

Table 3. Characteristics of recycled polyol (RP).

Acid number (mg KOH/g)	Viscosity at 25°C (mPa.s)	Hydroxyl number (mg KOH/g)	Water content	Sample
2.5	4600	38	0.004	RP

شیمیایی و فیزیکی آن بررسی شود. سایر مشخصه‌های RP در جدول ۳ ذکر شده است. مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های RP های صنعتی تولید شده نشان دهنده آن است که AN و OHV پلی‌ال بازیافتی سنتز شده به وسیله RA زیست پایه با نمونه‌های صنعتی نزدیک است [۳۷].

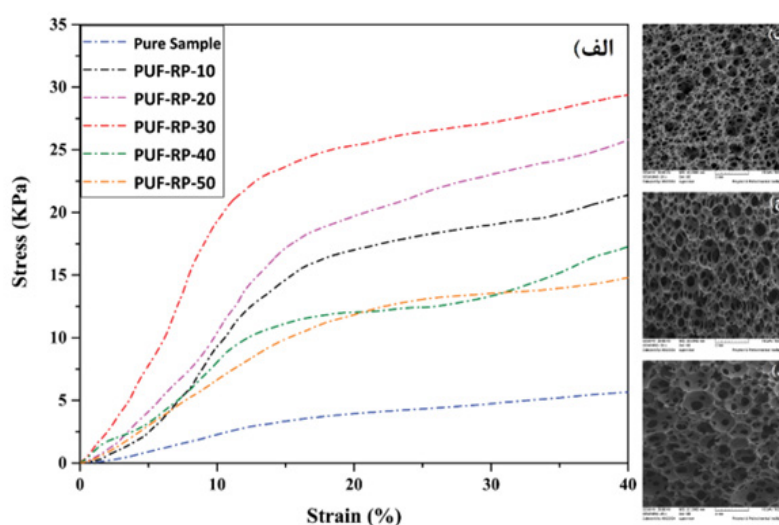
پس از بررسی فرایند بازیافت ضایعات PUF از طریق اسیدولیز، RP به عنوان یک جایگزین جزئی، از ۰ تا ۵۰ درصد (وزنی/وزنی) در بخش پلی‌ال فرمول تولید فوم بر پایه MDI استفاده شد (جدول ۲). با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی PUF های ساخته شده در این مطالعه، جایگزینی بخشی از پلی‌ال معمولی با RP منجر به تغییرات قابل توجهی در چگالی فوم نمی‌شود. چگالی نمونه خالص $39 \pm 1/2 \text{ kg.m}^{-3}$ بود و استفاده از PR به عنوان جایگزین پلی‌ال معمولی منجر به تغییر چگالی جزئی $0/6 \text{ kg.m}^{-3} \pm$ در

می‌شود. چگالی فوم‌های حاوی RP در فرمولاسیون عمدتاً به مقدار گاز آزاد شده در طول واکنش بستگی دارد [۱۵]. آب به عنوان یک عامل فوم زا برای تولید CO₂ از طریق واکنش با ایزوسیانات استفاده می‌شود، بنابراین محتوای عامل فوم زا نقشی اساسی در انبساط و چگالی فوم ایفا می‌کند [۴۷]. مطالعات دیگر توسط محققان دیگر مشاهده شد که نشان می‌دهد جایگزینی پلی‌ال بازیافتی به جای پلی‌ال مرسوم تأثیر قابل توجهی بر چگالی فوم حاصل ندارد [۴۸].

خواص فشاری نمونه‌ها تا ۴۰ درصد ارتفاع اولیه آن ارزیابی شد. شکل ۵ (الف) منحنی های تنش-کرنش تغییر شکل فشاری را برای PUF هایی که با پلی‌ال جایگزین ترکیب شده اند، نشان می‌دهد. مشاهده شد که مدول فشاری و مقاومت فشاری PUF-RP-30 بیشتر از نمونه‌های دیگر است. این بهبود در خواص فشاری به افزایش چگالی اتصال عرضی زمانی که RP به عنوان پلی‌ال استفاده می‌شود نسبت داده می‌شود. پلی‌ال بازیافتی عاملیت بالاتری نسبت به پلی‌ال معمولی دارد که منجر به چگالی اتصال

۳-۳- استفاده مجدد از پلی‌ال بازیافتی زیست پایه در فرمولاسیون PUF های انعطاف پذیر

پس از بررسی فرایند بازیافت ضایعات PUF از طریق اسیدولیز، RP به عنوان یک جایگزین جزئی، از ۰ تا ۵۰ درصد (وزنی/وزنی) در بخش پلی‌ال فرمول تولید فوم بر پایه MDI استفاده شد (جدول ۲). با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی PUF های ساخته شده در این مطالعه، جایگزینی بخشی از پلی‌ال معمولی با RP منجر به تغییرات قابل توجهی در چگالی فوم نمی‌شود. چگالی نمونه خالص $39 \pm 1/2 \text{ kg.m}^{-3}$ بود و استفاده از PR به عنوان جایگزین پلی‌ال معمولی منجر به تغییر چگالی جزئی $0/6 \text{ kg.m}^{-3} \pm$ در



شکل ۴. منحنی های تنش-کرنش فشاری PUF های تولید شده با استفاده از RP (الف) و تصاویر SEM نمونه‌های PUF خام (ب)، PUF-RP-30 (ج) و PUF-RP-50 (د).

Figure 4. Compressive stress-strain curves of PUFs produced using RP (a) and SEM images of raw PUF (b), PUF-RP-30 (c), and PUF-RP-50 (d).

شود. از رسینولیک اسید، یک اسید زیست‌پایه سنتز شده به‌عنوان یک عامل شکننده یورتان در PUF استفاده شد. PUF تخریب شده به پلی‌ال حاوی مواد تجدیدپذیر تبدیل شد. طیف‌سنجی‌های $^1\text{H-NMR}$ و FTIR ساختار شیمیایی RP را ثابت کردند. وزن مولکولی مناسب RP به‌عنوان پلی‌ال برای PUF انعطاف‌پذیر با استفاده از GPC تأیید شد. RP‌های تولید شده دارای ویژگی‌های صنعتی قابل‌قبولی هستند. RP به‌دست‌آمده از ترکیب زیست‌پایه به‌عنوان یک جایگزین جزئی برای پلی‌ال مرسوم برای تولید PUF انعطاف‌پذیر استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی RP با پلی‌ال پایه تا ۳۰ درصد برای به‌طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی، مورفولوژی و چگالی فوم‌های PUF انعطاف‌پذیر را مختل نمی‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که فرایند پیشنهادی برای بازیافت PUF پتانسیل صنعتی شدن را دارد. در آینده، رویکرد بازیافت PUF انعطاف‌پذیر از طریق ترکیب زیست‌پایه و تجدیدپذیر، اقتصاد پایدار را بهبود می‌بخشد و نرخ استفاده مجدد از PUF‌ها را در صنعت افزایش می‌دهد.

عرضی بالاتر در فوم PU اصلاح شده می‌شود. علاوه بر این، محتوای RP بالاتر به MDI بیشتری برای واکنش نیاز داشت که منجر به چگالی اتصال عرضی بالاتر و تشکیل گروه‌های اوره بیشتر می‌شود. افزایش محتوای گروه بیورت نیز می‌تواند تشکیل شود که منجر به بخش‌های سخت‌تر در ماتریس پلی‌یورتان می‌شود. به دلیل استفاده از RP، این افزایش بخش سخت، عامل کلیدی افزایش مقاومت فشاری و مدول مشاهده شده در نمونه‌های PUF اصلاح‌شده بوده است. مشخص شد که مقاومت فشاری پس از جایگزینی ۳۰٪ از پلی‌ال بازیافتی کاهش یافته است. تخمین زده می‌شود که این مشاهدات مربوط به مورفولوژی PUF تولید شده باشد. برای این منظور، مورفولوژی فوم‌های تولید شده با RP جایگزین شده با استفاده از SEM بررسی شد.

شکل ۵ (ب، ج، د) ساختار سلولی PUF‌ها بازیابی شده را نشان می‌دهد. شکل ۵ (ب) متعلق به PUF بدون هیچ‌گونه RP جایگزین (نمونه خالص) است. مشاهده می‌شود که PUF دارای یک ساختار سلول باز است که تمام سلول‌ها به هم متصل هستند. اندازه سلول موردبررسی قرار گرفت و با افزایش محتوای RP در PUF کاهش یافت. شکل‌های ۵ (ج) و (د) مربوط به PUF‌های تولید شده توسط ۳۰٪ و ۵۰٪ از پلی‌ال جایگزین شده است. افزودن RP به فرمول در درجه اول بر اندازه و شکل ساختار سلولی فوم PU تأثیر می‌گذارد. تصاویر SEM مورفولوژی سلولی فوم را در جهت افزایش نشان می‌دهد. اندازه سلول‌های فوم به‌طور کلی به گروه امید در ساختار RP مربوط می‌شود. سلول‌های بسته به دلیل پیوند هیدروژنی بین مولکولی قوی بین گروه عاملی امید تشکیل می‌شوند. افزایش فراوانی سلول‌های بسته مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. با جایگزینی RP بیش از ۳۰ درصد، پیوند هیدروژنی بین مولکولی بین گروه عاملی امید بر واکنش‌های فوم تأثیر می‌گذارد و منجر به سلول‌های غیر یکنواخت می‌شود. قابل ذکر است که PUF‌ها با ساختار سلولی غیر یکنواخت دارای خواص مکانیکی ضعیفی هستند که دلیل مقاومت فشاری ضعیف در نمونه‌های حاوی بیش از ۳۰٪ پلی‌ال بازیافتی به این خاطر می‌باشد [۴۹].

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه یک فرایند بازیافت شیمیایی PUF سبز و اقتصادی، با استفاده از یک ترکیب زیست‌پایه سنتز شده را نشان داد. برای این منظور، از روغن کرچک جهت سنتز RA، یک اسید زیست‌پایه با وزن مولکولی بالا و زنجیره آویزان استفاده شد. آنالیزهای طیف‌سنجی FTIR و $^1\text{H-NMR}$ سنتز موفقیت‌آمیز RA را تأیید کردند. سعی شد از منابع تجدیدپذیر در بازیافت PUF استفاده

۵- مراجع

- [1] B. Eling and W. Friederichs, *Polyurethanes: Polyols, Isocyanates, Rigid Foams, Flexible Foams, Elastomers*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2025.
- [2] I. Sharan, S. Sinha, and V. C. Srivastava, "State-of-the-art and recent progress in the synthesis of polyurethanes," *Reviews in Chemical Engineering*, no. 0, 2025.
- [3] D. Simón, A. Borreguero, A. De Lucas, and J. Rodríguez, "Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability," *Waste Management*, vol. 76, pp. 147-171, 2018.
- [4] I. Omrani, "High performance biobased pour-in-place rigid polyurethane foams from facile prepared castor oil-based polyol: Good compatibility with pentane series blowing agent," *Journal of Cellular Plastics*, vol. 58, no. 3, pp. 449-466, 2022.
- [5] S. A. Madbouly, "Novel recycling processes for thermoset polyurethane foams," *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, p. 100835, 2023.
- [6] A. Delavarde et al., "Sustainable polyurethanes: toward new cutting-edge opportunities," *Progress in Polymer Science*, p. 101805, 2024.
- [7] X. Li et al., "Recent applications and developments of Polyurethane materials in pavement engineering," *Construction and Building Materials*, vol. 304, p. 124639, 2021.
- [8] A. A. Maamoun, M. Arafa, and A. M. Esawi, "Flexible polyurethane foam: materials, synthesis, recycling, and applications in energy harvesting—a review," *Materials Advances*, 2025.
- [9] T. Vanbergen, I. Verlent, J. De Geeter, B. Haelterman, L. Claes, and D. De Vos, "Recycling of flexible polyurethane foam by split-phase alcoholysis: identification of additives and alcoholyzing agents to reach higher efficiencies," *ChemSusChem*, vol. 13, no. 15, pp. 3835-3843, 2020.
- [10] I. Omrani, R. Mohammadi Berenjegan, E. Sharghi Asbagh, and H. Yeganeh, "Soundproofing properties of open-cell microcellular polyurethane foam containing styrene-grafted polyester polyol," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, p. 07316844241242871, 2024.
- [11] R. Donadini et al., "Chemical recycling of polyurethane waste via a microwave-assisted glycolysis process," *Acs Omega*, vol. 8, no. 5, pp. 4655-4666, 2023.
- [12] L. Zhao and V. Semetey, "Recycling polyurethanes through transcarbamoylation," *ACS omega*, vol. 6, no. 6, pp. 4175-4183, 2021.
- [13] K. Wieczorek, P. Bukowski, K. Stawiński, and I. Ryłko, "Recycling of polyurethane foams via glycolysis: A review," *Materials*, vol. 17, no. 18, p. 4617, 2024.
- [14] S. Zhang, X.-Q. Xu, S. Liao, Q. Pan, X. Ma, and Y. Wang, "Controllable degradation of polyurethane thermosets with silaketel linkages in response to weak acid," *ACS Macro Letters*, vol. 11, no. 7, pp. 868-874, 2022.
- [15] S. R. Shin, H. N. Kim, J. Y. Liang, S. H. Lee, and D. S. Lee, "Sustainable rigid polyurethane foams based on recycled polyols from chemical recycling of waste polyurethane foams," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 136, no. 35, p. 47916, 2019.
- [16] B. Dhotkar, R. Chhabra, and V. Eswaran, "Flow of non-Newtonian polymeric solutions through fibrous media," *Journal of applied polymer science*, vol. 76, no. 7, pp. 1171-1185, 2000.
- [17] G. T. Howard, "Biodegradation of polyurethane: a review," *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 49, no. 4, pp. 245-252, 2002.
- [18] K. M. Zia, H. N. Bhatti, and I. A. Bhatti, "Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review," *Reactive and functional polymers*, vol. 67, no. 8, pp. 675-692, 2007.
- [19] I. Vermeulen, J. Van Caneghem, C. Block, J. Baeyens, and C. Vandecasteele, "Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation," *Journal of hazardous materials*, vol. 190, no. 1-3, pp. 8-27, 2011.
- [20] Y. Deng, R. Dewil, L. Appels, R. Ansart, J. Baeyens, and Q. Kang, "Reviewing the thermochemical recycling of waste polyurethane foam," *Journal of environmental management*, vol. 278, p. 111527, 2021.
- [21] K. Kanaya and S. Takahashi, "Decomposition of polyurethane foams by alkanolamines," *Journal of applied polymer science*, vol. 51, no. 4, pp. 675-682, 1994.
- [22] C.-H. Wu, C.-Y. Chang, C.-M. Cheng, and H.-C. Huang, "Glycolysis of waste flexible polyurethane foam," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 80, no. 1, pp. 103-111, 2003.
- [23] C. Molero, A. de Lucas, F. Romero, and J. F. Rodríguez, "Glycolysis of flexible polyurethane wastes using stannous octoate as the catalyst," *Journal of material cycles and waste management*, vol. 11, pp. 130-132, 2009.

- [24] N. Hekmatjoo, Z. Ahmadi, F. Afshar Taromi, B. Rezaee, F. Hemmati, and M. R. Saeb, "Modeling of glycolysis of flexible polyurethane foam wastes by artificial neural network methodology," *Polymer International*, vol. 64, no. 9, pp. 1111-1120, 2015.
- [25] A. Marson, M. Masiero, M. Modešti, A. Scipioni, and A. Manzardo, "Life cycle assessment of polyurethane foams from polyols obtained through chemical recycling," *ACS omega*, vol. 6, no. 2, pp. 1718-1724, 2021.
- [26] M. B. Johansen, B. S. Donslund, S. K. Kristensen, A. T. Lindhardt, and T. Skrydstrup, "tert-Amyl Alcohol-Mediated Deconstruction of Polyurethane for Polyol and Aniline Recovery," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 10, no. 34, pp. 11191-11202, 2022.
- [27] J. Ko, M. Zarei, S. G. Lee, and K. Cho, "Single-Phase Recycling of Flexible Polyurethane Foam by Glycolysis and Oxyalkylation: Large-Scale Industrial Evaluation," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 11, no. 27, pp. 10074-10082, 2023.
- [28] R. Beran, L. Zárbynická, D. Machová, M. Večeřa, and P. Kalenda, "Wood adhesives from waste-free recycling depolymerisation of flexible polyurethane foams," *Journal of Cleaner Production*, vol. 305, p. 127142, 2021.
- [29] M. Grdadolnik et al., "Chemical recycling of flexible polyurethane foams by aminolysis to recover high-quality polyols," *ACS sustainable chemistry & engineering*, vol. 11, no. 29, pp. 10864-10873, 2023.
- [30] A. Guchait, D. Maity, and A. S. Sabnis, "Recycling of waste polyurethane shoe sole via aminolysis route," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, pp. 1-12, 2024.
- [31] G. Rossignolo and G. Malucelli, "Recycling of Polyurethanes: where we are and where we are going to," *Green Chemistry*, vol. 1132-1152, p. 1137, 2024.
- [32] S. Chuayjuljit, C. Norakankorn, and V. Pimpan, "Chemical recycling of rigid polyurethane foam scrap via base catalyzed aminolysis," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 12, no. 1, pp. 19-22, 2002.
- [33] S. Bhandari and P. Gupta, "Chemical depolymerization of polyurethane foam via ammonolysis and aminolysis," in *Recycling of Polyurethane Foams*: Elsevier, 2018, pp. 77-87.
- [34] N. V. Gama, A. Ferreira, and A. Barros-Timmons, "Polyurethane foams: Past, present, and future," *Materials*, vol. 11, no. 10, p. 1841, 2018.
- [35] Y. Arun, R. Ghosh, and A. J. Domb, "Poly (ester-anhydrides) Derived from Esters of Hydroxy Acid and Cyclic Anhydrides," *Biomacromolecules*, vol. 23, no. 8, pp. 3417-3428, 2022.
- [36] M. Sołtysiński, K. Piszczek, D. Romecki, S. Narożniak, J. Tomaszewska, and K. Skórczewska, "Conversion of polyurethane technological foam waste and post-consumer polyurethane mattresses into polyols—industrial applications," *Polimery*, vol. 63, no. 3, pp. 234-238, 2018.
- [37] H&S. "Report - Reactors and Processes for Synthesis of Polyol from flexible PU residues." <https://www.hs-anlagentechnik.de/en/3498-2/3565-2/3568-2/> (accessed in August 2024).
- [38] B. Liu et al., "Opportunities in Closed-Loop Molecular Recycling of End-of-Life Polyurethane," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 11, no. 16, pp. 6114-6128, 2023.
- [39] "Eco-profiles for determining environmental impacts of plastics." *PLASTICS EUROPE*. <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/> (accessed in August 2024).
- [40] W. S. Jin et al., "An insight into the recycling of waste flexible polyurethane foam using glycolysis," *Elastomers and composites*, vol. 58, no. 1, pp. 32-43, 2023.
- [41] B. Liu et al., "Polyurethane Foam Chemical Recycling: Fast Acidolysis with Maleic Acid and Full Recovery of Polyol," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 12, no. 11, pp. 4435-4443, 2024.
- [42] H. He et al., "Chemical recycling of waste polyurethane foams: Efficient acidolysis under the catalysis of zinc acetate," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 11, no. 14, pp. 5515-5523, 2023.
- [43] B. Godinho, N. Gama, A. Barros-Timmons, and A. Ferreira, "Recycling of different types of polyurethane foam wastes via acidolysis to produce polyurethane coatings," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 29, p. e00330, 2021.
- [44] B. Godinho, N. Gama, A. Barros-Timmons, and A. Ferreira, "Recycling of polyurethane wastes using different carboxylic acids via acidolysis to produce wood adhesives," *Journal of Polymer Science*, vol. 59, no. 8, pp. 697-705, 2021.
- [45] M. Grdadolnik et al., "Insight into chemical recycling of flexible polyurethane foams by acidolysis," *ACS sustainable chemistry & engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 1323-1332, 2022.
- [46] B. Liu et al., "Vapor-Phase Dicarboxylic Acids and Anhydrides Drive Depolymerization of Polyurethanes," *ACS Macro Letters*, vol. 13, no. 4, pp. 435-439, 2024.
- [47] N. Kraitape and C. Thongpin, "Influence of recycled polyurethane polyol on the properties of

flexible polyurethane foams,” Energy Procedia, vol. 89, pp. 186-197, 2016.

[48] D. Simón, A. De Lucas, J. Rodríguez, and A. Borreguero, “Flexible polyurethane foams synthesized employing recovered polyols from glycolysis: Physical and structural properties,” Journal of Applied Polymer Science, vol. 134, no. 32, p. 45087, 2017.

[49] C. K. Trinh and N. I. Abdo, “A Mini-Review: Intermolecular interactions of small molecules containing amide groups-based organic semiconductors and their applications,” Journal of Molecular Structure, vol. 1269, p. 133764, 2022.