

# بازیافت شیمیایی پلی اتیلن ترفتالات به ترفتالیک اسید به وسیله آبکافت با سولفوریک اسید

## Obtaining Terephthalic Acid by Chemical Recycling of Polyethylene Terephthalate via Hydrolysis Using Sulphuric Acid

عبدالرسول ارومیه ای<sup>۱</sup>، اعظم رحیمی<sup>۲</sup>، عبدالله شیخ نژاد<sup>۱</sup>، احمد ربیعی<sup>۲</sup>

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، ۱- پژوهشکده فرایند، گروه پلاستیک، ۲- پژوهشکده علوم، گروه

علوم و کاتالیست، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۸۳۷/۱۴، پذیرش: ۸۳/۱۲/۲

### چکیده

ضایعات پلی اتیلن ترفتالات (PET) را می توان با روشهای مکانیکی و شیمیایی بازیافت کرد. آبکافت یکی از روشهای شیمیایی بازیافت پلی اتیلن ترفتالات است. مزایای این روش، تهیه مستقیم ترفتالیک اسید بدون ایجاد محصول واسطه، خلوص زیاد ترفتالیک اسید (TPA) حاصل و ارزانی مواد اولیه است. در این پژوهش، واپلیمر شدن پلی اتیلن ترفتالات به ترفتالیک اسید به وسیله آبکافت با سولفوریک اسید به منظور دستیابی به بیشترین بازده ترفتالیک اسید بررسی شده است. محدوده غلظت سولفوریک اسید بین ۳ تا ۱۵ M، زمان بین ۳ تا ۷ h و دما بین ۱۳۰ تا ۱۷۰°C انتخاب شده است. در نهایت غلظت ۱۲ M سولفوریک اسید، زمان ۵ h و دمای ۱۴۰°C که در این شرایط بیشترین مقدار تبدیل PET و بازده ترفتالیک اسید بدست می آید به عنوان شرایط بهینه برای واپلیمر شدن PET مشخص شد. ترفتالیک اسید حاصل با روشهای طیف سنجی FTIR، تجزیه عنصری و تعیین ارزش اسیدی بررسی شد. ارزش اسیدی ترفتالیک اسید حاصل از شرایط بهینه ۶۶۷ بوده، نتایج حاصل مؤید آن است که بازده ترفتالیک اسید تقریباً با مقدار تبدیل PET برابر است.

### واژه های کلیدی

پلی اتیلن ترفتالات، بازیافت،  
آبکافت، ترفتالیک اسید،  
سولفوریک اسید.

### مقدمه

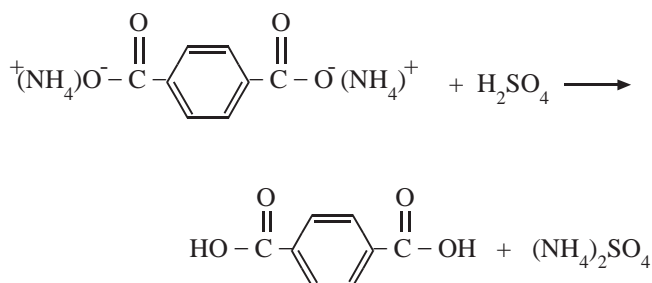
طبیعی و سرمایه های ملی می شود. به همین منظور در کشورهای مختلف بویژه کشورهای صنعتی روشهای مختلفی برای بازیافت آن پیشنهاد و اجرا و واحدهای بازیافت متعددی ایجاد شده است [۱،۲] از جمله این روشها می توان به دو روش اصلی بازیافت مکانیکی و شیمیایی

مصرف روز افزون پلی اتیلن ترفتالات و کاربرد وسیع آن در صنایع مختلف، موجب افزایش ضایعات (خانگی و صنعتی) شده است. این ضایعات از طرفی به دلیل عدم تجزیه به وسیله میکروارگانیسمهای خاک باعث آلودگی محیط زیست شده، از سوی دیگر موجب اتلاف منابع

### Key Words

PET, recycling,  
hydrolysis, terephthalic acid,  
sulphuric acid

\* مسئول مکاتبات، پیام نگار: a.romiehie@ippi.ac.ir



باتوجه به مطالعات انجام شده و نتایج حاصل از آنها، در این پژوهش تبدیل PET به ترفتالیک اسید از طریق آبکافت با سولفوریک اسید در شرایط مختلف دما و زمان و در غلظت‌های مختلف سولفوریک اسید (بدون اضافه کردن کاتالیزور) بررسی شده است.

### تجربی

#### مواد

در این پژوهش، از دانه‌های PET در اندازه‌های ۲x ۲/۸mm به عنوان خوراک اصلی واکنش آبکافت استفاده شده است. دیگر مواد شیمیایی که حین آزمایشها مصرف شده عبارتند از: سولفوریک اسید (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)، دی متیل سولفوکسید (DMSO)، پتاسیم هیدروکسید (KOH)، فنول فتالین و آمونیاک.

#### دستگاهها

در این مطالعه برای آبکافت PET از راکتور شیشه‌ای دو جداره، برای شناسایی ترفتالیک اسید از دستگاه طیف سنج زیر قرمز (FTIR) مدل Mattson ۱۰۰۰ و برای تعیین محتوای عنصری از دستگاه تجزیه عنصری مدل Varb El III ساخت شرکت Elementar استفاده شد.

#### روشها

کارهای عملی شامل دو بخش آبکافت PET و جداسازی ترفتالیک اسید است. برای دستیابی به بهترین بازده آبکافت PET، آزمایشها در سه مرحله زیر انجام شد:

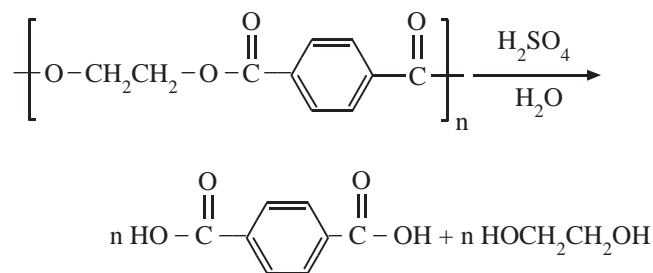
مرحله اول - دما و زمان ثابت و غلظت سولفوریک اسید متغیر،  
مرحله دوم - غلظت سولفوریک اسید و دما ثابت و زمان متغیر و  
مرحله سوم - غلظت سولفوریک اسید و زمان ثابت و دما متغیر.  
مواد و روشها در همه مراحل یکسان بوده، تنها عوامل دما، زمان و غلظت سولفوریک اسید تغییر می‌کند. بدین ترتیب که در هر مرحله از ۲۰g نمونه PET و ۳۰۰ mL سولفوریک اسید با غلظت مشخص استفاده شد. سپس، محلول حاصل از آبکافت را که شامل ذرات معلق

اشاره کرد. در روش مکانیکی هدف احیای خواص مکانیکی PET و استفاده مجدد از آن به شکل دانه است که غالباً نمونه بازیافتی خواص نمونه اصلی را ندارد و همواره نسبت به نمونه اصلی کاهش خواص دارد [۲]. در روش شیمیایی هدف بدست آوردن مونومرهای اولیه موجود در ساختار پلیمر است، بطوری که پس از بازیافت این مونومرها در ساخت مجدد PET و سایر مواد شیمیایی بکار می‌روند.

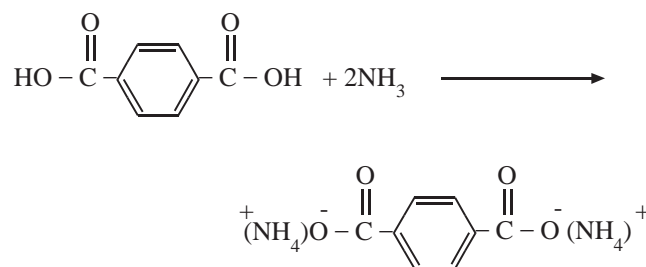
بازیافت شیمیایی به روشهای گوناگون مانند الکل کافت، گلیکول کافت، آبکافت و صابونی شدن انجام می‌شود. از جمله پژوهشهایی که در زمینه بازیافت شیمیایی PET انجام شده است می‌توان به عنوان مثال به بررسی اثر رطوبت بر تخریب پلی استرها [۳]، متانول کافت - گلیکول کافت PET [۴،۵] آبکافت PET به وسیله سولفوریک اسید و نیتریک اسید [۶-۸]، واپلیم شدن هیدرولیکی مذاب PET [۹]، واپلیم شدن قلیایی PET [۱۰] و بازیافت ضایعات الیاف و بطریهای PET [۱۱،۱۲] اشاره کرد. در تمام این پژوهشها PET به مونومرهای اولیه (ترفتالیک اسید، دی متیل ترفتالات، اتیلن گلیکول و بیس (۲ - هیدروکسی اتیلن) ترفتالات) تبدیل شده است که می‌توان از آنها به عنوان ماده اولیه برای تولید مجدد پلی اتیلن ترفتالات و سایر پلی استرها استفاده کرد. واکنشهای آبکافت پلی اتیلن ترفتالات با سولفوریک اسید در زیر نشان داده شده است:

#### الف - واکنش آبکافت PET

این واکنش عکس واکنش استری شدن است که در نتیجه آن زنجیرهای پلیمر در نقاط استری (پیوندهای استری) با آب و در مجاورت کاتالیزور شکسته شده، در نهایت منجر به تشکیل مونومرهای اولیه می‌شود.



ب) واکنشهای شیمیایی که در فرایند بازیافت ترفتالیک اسید اتفاق می‌افتد.



جدول ۱ نتایج حاصل از آبکافت PET در مرحله اول.

مقدار بازیافت ترفتالیک اسید (%)	مقدار تبدیل PET (%)	غلظت سولفوریک اسید مصرفی (M)
۰	۰	۳
۰/۷۴	۰/۷۵	۵
۷/۸	۷/۹	۸
۵۱	۵۲/۲	۱۰
۶۸/۸	۷۱/۳	۱۱
۹۳/۳	۹۷/۷	۱۲
۹۳/۸	۹۸/۲	۱۳
۹۴/۱	۹۹	۱۴
۹۴/۵	۱۰۰	۱۵

جدول ۲ نتایج حاصل از آبکافت PET در مرحله دوم.

مقدار بازیافت ترفتالیک اسید (%)	مقدار تبدیل PET (%)	زمان (h)
۸۰/۷	۸۱/۹	۳
۸۵/۳	۸۸/۶	۴
۹۳/۳	۹۷/۷	۵
۹۴/۲	۹۸/۵	۶
۹۳/۶	۹۹	۷

جدول ۳ نتایج حاصل از آبکافت PET در مرحله سوم.

مقدار بازیافت ترفتالیک اسید (%)	مقدار تبدیل PET (%)	دما (°C)
۸۳/۶	۸۵	۱۳۰
۹۴/۱	۹۶/۲	۱۴۰
۹۳/۳	۹۷/۷	۱۵۰
۹۳	۹۸/۶	۱۶۰
۹۲/۹	۱۰۰	۱۷۰

اندازه‌گیری ارزش اسیدی [۴]

$$AV = \frac{N \times V}{m} \quad (3)$$

در این معادله AV ارزش اسیدی اسید ترفتالیک حاصل، V حجم پتاسیم هیدروکسید مصرفی در تیتراژ بر حسب میلی‌لیتر، N نرمالیه پتاسیم هیدروکسید و m وزن نمونه ترفتالیک اسید بر حسب گرم است.

ترفتالیک اسید و PET تبدیل نشده است صاف کرده، به وسیله محلول آمونیاک رسوب ترفتالیک اسید از آلودگی‌های جامد از جمله PET تبدیل نشده جدا شد. ترفتالیک اسید جدا شده در آمونیاک محلول است. پس از آن ترفتالیک اسید با سولفوریک اسید از محلول آمونیاک به شکل رسوب جدا شده، حداقل سه مرتبه با آب مقطر شسته شد. سرانجام رسوب سفید ترفتالیک اسید درون آن در دمای ۱۰۵°C خشک شد.

### مرحله اول

این مرحله در محدوده غلظت ۳-۱۵ M سولفوریک اسید در شرایط ثابت دمای ۱۵۰°C و زمان ۵ h انجام و غلظت بهینه ۱۲ M حاصل شد. نتایج این مرحله در جدول آمده است.

### مرحله دوم

این مرحله در محدوده زمانی ۳ تا ۷ h در شرایط ثابت غلظت ۱۲ M سولفوریک اسید و دمای ۱۵۰°C انجام و زمان بهینه ۵ h حاصل شد. نتایج این مرحله در جدول ۲ ارائه شده است.

### مرحله سوم

این مرحله در محدوده دمایی ۱۳۰-۱۷۰°C در شرایط ثابت زمانی ۵ h و غلظت ۱۲ M سولفوریک اسید انجام و دمای بهینه ۱۴۰°C حاصل شد. نتایج این مرحله در جدول ۳ آمده است.

## نتایج و بحث

در این بخش چگونگی محاسبه مقدار تبدیل PET و ارزش اسیدی و آثار عوامل متفاوت بر آن بررسی می‌شود.

### محاسبه داده‌ها و نتایج حاصل

اندازه‌گیری مقدار تبدیل PET و ترفتالیک اسید [۴]:

$$PET(\%) = \frac{W_{PET,i} - W_{PET,R}}{W_{PET,i}} \times 100 \quad (1)$$

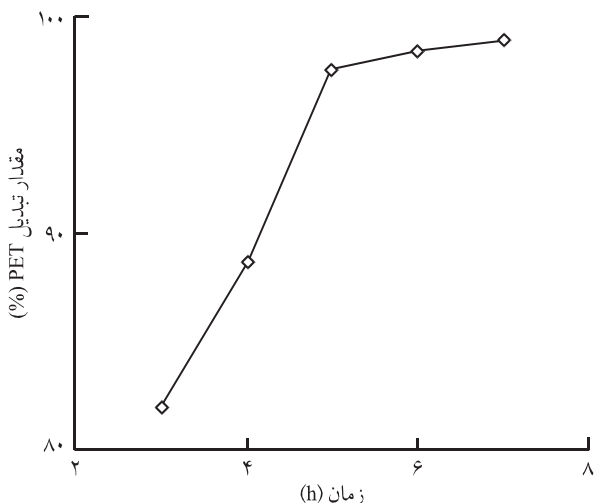
$$TPA(\%) = (M_{TPA,o} / M_{PET,i}) \times 100 \quad (2)$$

در این معادله  $W_{PET,i}$  وزن اولیه PET،  $W_{PET,R}$  وزن نهایی PET (وزن PET واکنش نداده)،  $M_{TPA,o}$  تعداد مولهای TPA حاصل از واکنش و  $M_{PET,i}$  تعداد مولهای مونومر (TPA) در نمونه PET اولیه است.

## اثر غلظت سولفوریک اسید

نتایج حاصل از آبکافت PET در مرحله اول در جدول ۱ آمده است. شکل ۱ اثر غلظت سولفوریک اسید را بر مقدار تبدیل PET و بازیافت ترفتالیک اسید نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بازده ترفتالیک اسید حاصل متناسب با بازده تبدیل PET است [۴،۱۰]. با توجه به این شکل می‌توان گفت که با افزایش غلظت سولفوریک اسید مقدار تبدیل PET و متعاقب آن بازیافت ترفتالیک اسید نیز افزایش می‌یابد، اما این افزایش در همه محدوده‌های غلظت یکسان نیست. بدین ترتیب که در محدوده غلظت ۳-۵ M سولفوریک اسید بازده بسیار کم و تقریباً صفر است. در حالی که با افزایش غلظت در محدوده غلظتهای ۸-۱۲ M افزایش زیاد در بازده آبکافت مشاهده می‌شود. پس از این محدوده با افزایش غلظت سولفوریک اسید هیچ افزایش یا تغییر محسوسی در مقدار تبدیل PET و بازیافت ترفتالیک اسید مشاهده نمی‌شود. بنابراین، در شرایط تعریف شده در این مرحله بیشترین تبدیل PET در غلظت ۱۲ M سولفوریک اسید بدست می‌آید (غلظت بهینه).

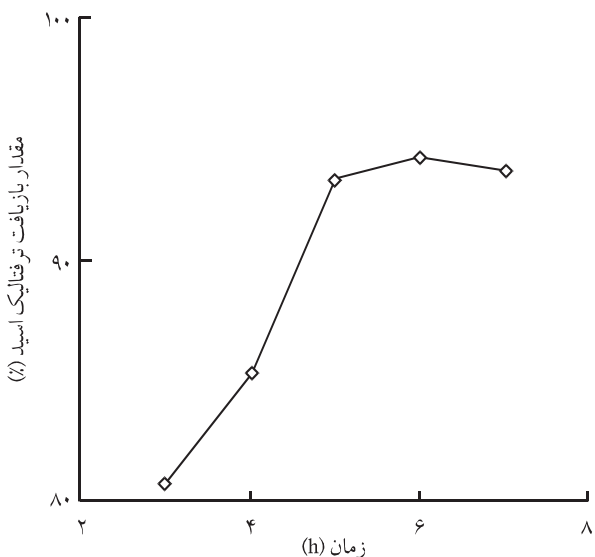
با مقایسه نمودارهای تبدیل PET و بازیافت ترفتالیک اسید مشاهده می‌شود که در غلظتهای ۳-۱۰ M این نمودارها تقریباً برهم منطبق بوده، بعد از این محدوده با افزایش غلظت سولفوریک اسید فاصله نمودارها بتدریج افزایش می‌یابد و سرانجام این فاصله در غلظت ۱۲ M سولفوریک اسید بعد از آن به بیشترین مقدار می‌رسد که این وضعیت احتمالاً به دلیل خطای شخصی و وجود واکنشهای مزاحم از قبیل تخریب است.



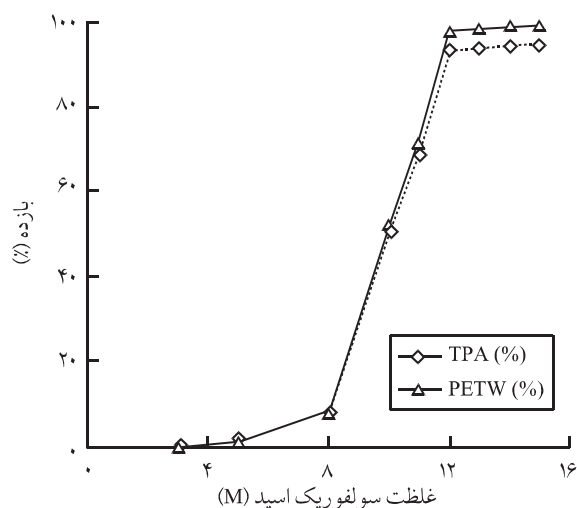
شکل ۲ نمودار تغییر مقدار تبدیل PET بر حسب زمان در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  و غلظت بهینه ۱۲ M.

## اثر زمان آبکافت

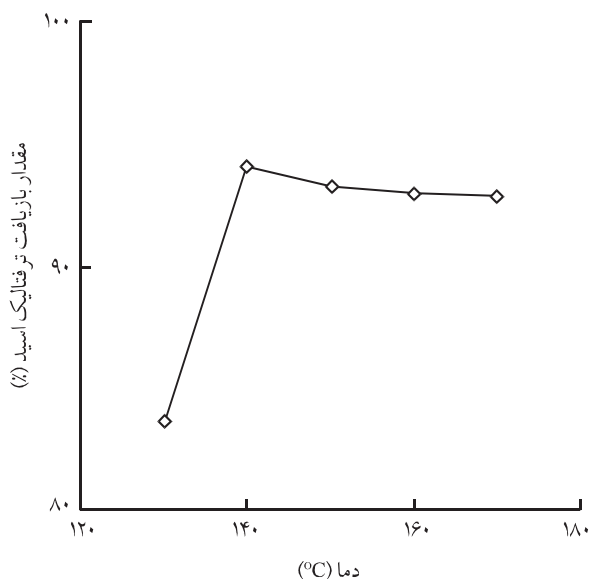
در جدول ۲ نتایج حاصل از آبکافت PET در محدوده زمانی ۳ تا ۷ h، غلظت ثابت ۱۲ M و دمای  $150^{\circ}\text{C}$  آمده است (فشار محیط). شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب اثر زمان آبکافت را روی مقدار تبدیل PET و بازیافت ترفتالیک اسید نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در شرایط تعریف شده برای مرحله دوم بازیافت ترفتالیک اسید حاصل متناسب با مقدار تبدیل PET است و اختلاف بین این دو بسیار کم است. با توجه به شکل ۲ با افزایش زمان واکنش مقدار



شکل ۳ نمودار بازیافت ترفتالیک اسید بر حسب زمان در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  و غلظت بهینه ۱۲ M.



شکل ۱ نمودار تغییر مقدار تبدیل PET و بازیافت ترفتالیک اسید بر حسب غلظت سولفوریک اسید در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  و زمان ۵ h.



شکل ۵ نمودار تغییر بازیافت ترفتالیک‌اسید برحسب دما (زمان ۵ h و غلظت بهینه اسید ۱۲ M).

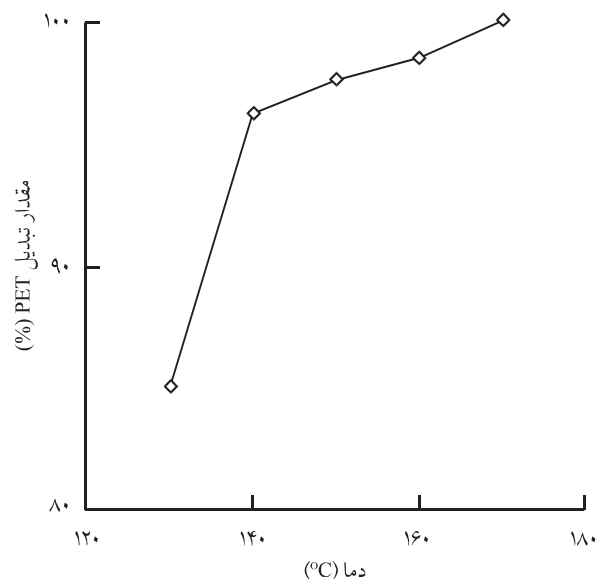
درصد است، ولی با افزایش دما تا بیش از  $140^{\circ}\text{C}$  بازده ترفتالیک‌اسید تغییری نمی‌کنند و ثابت می‌ماند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت ۱۲ M سولفوریک‌اسید و زمان ۵ h، دمای بهینه برای بازیافت PET (آبکافت)  $140^{\circ}\text{C}$  است.

#### اثر متغیرهای آبکافت روی ارزش اسیدی ترفتالیک‌اسید

جدول ۴ مقادیر ارزش اسیدی نمونه‌های ترفتالیک‌اسید حاصل از مرحله اول و شکل ۶ اثر غلظت سولفوریک‌اسید را بر ارزش اسیدی نمونه‌های ترفتالیک‌اسید حاصل از این مرحله نشان می‌دهد (دمای

جدول ۴ مقادیر ارزش اسیدی نمونه‌های ترفتالیک‌اسید حاصل از مرحله اول.

غلظت سولفوریک‌اسید (M)	ارزش اسیدی ترفتالیک‌اسید (AV)
۵	۵۶۸
۸	۶۲۰
۱۰	۶۶۷
۱۱	۶۶۶
۱۲	۶۶۸
۱۳	۶۶۵
۱۴	۶۶۷
۱۵	۶۶۸



شکل ۴ نمودار مقدار تبدیل PET برحسب دما (زمان ۵ h و غلظت بهینه اسید ۱۲ M).

تبدیل PET نیز افزایش می‌یابد [۴، ۱۰] به همین ترتیب شکل ۳ که مربوط به بازیافت ترفتالیک‌اسید است توجیه پذیر است. با توجه به شکل ۴ در شرایط دما و غلظت ثابت بازیافت ترفتالیک‌اسید حاصل از آبکافت PET در محدوده زمانی ۳ تا ۵ h افزایش می‌یابد، بطوری که به ترتیب در زمانهای ۳، ۴ و ۵ h بازده‌های ۸۰/۷، ۸۵/۳ و ۹۳/۳ درصد برای TPA بدست می‌آید. پس از این محدوده با افزایش زمان در همان شرایط مقادیر بدست آمده برای ترفتالیک‌اسید تغییر چندانی نمی‌کند و ثابت می‌ماند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت ۱۲ M سولفوریک‌اسید و دمای  $150^{\circ}\text{C}$  بیشترین بازده برای ترفتالیک‌اسید در مدت زمان ۵ h بدست می‌آید که همان زمان بهینه است.

#### اثر دمای آبکافت

در جدول ۳ نتایج حاصل از آبکافت PET در محدوده دمایی  $130^{\circ}\text{C}$  تا  $170^{\circ}\text{C}$ ، غلظت ثابت ۱۲ M و زمان ۵ h آمده است. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب اثر دمای آبکافت را بر مقدار تبدیل PET و بازیافت ترفتالیک‌اسید نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، هم مقدار تبدیل PET و هم بازیافت ترفتالیک‌اسید در شرایط تعریف شده برای مرحله سوم در محدوده خاصی از دمای آبکافت افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که در محدوده دمایی  $130^{\circ}\text{C}$  تا  $140^{\circ}\text{C}$  مقدار تبدیل PET و بازیافت ترفتالیک‌اسید افزایش یافته، بعد از این محدوده با افزایش دمای آبکافت مقادیر مربوط تغییر محسوسی نمی‌کند و ثابت می‌ماند. بطوری که بازیافت ترفتالیک‌اسید در دماهای  $130^{\circ}\text{C}$  و  $140^{\circ}\text{C}$  به ترتیب ۸۳/۶ و ۹۴/۱

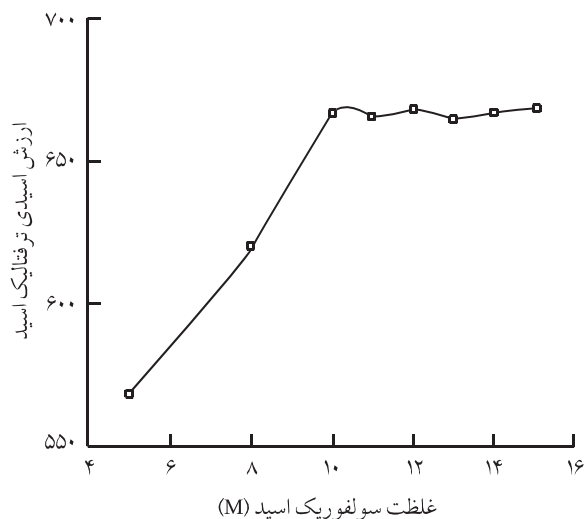
جدول ۵ مقادیر ارزش اسیدی ترفتالیک اسید در مرحله دوم.

ارزش اسیدی ترفتالیک اسید	زمان (h)
۶۴۵	۳
۶۵۴	۴
۶۶۸	۵
۶۶۷	۶
۶۶۸	۷

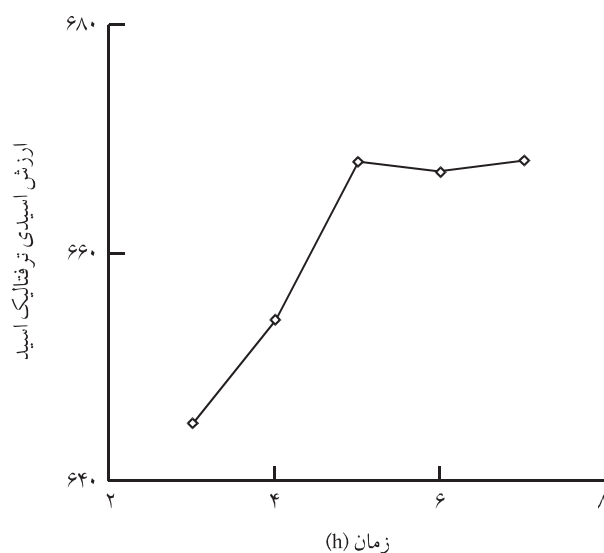
(دمای  $150^{\circ}\text{C}$  و غلظت اسید  $12\text{ M}$ ). همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود، ارزش اسیدی ترفتالیک اسید در محدوده زمانی ۳ تا ۵ h افزایش می یابد و بعد از این محدوده با افزایش زمان ارزش اسیدی تغییر محسوسی نمی کند و ثابت می ماند [۴،۱۰].

#### اثر دمای آبکافت

مقادیر ارزش اسیدی ترفتالیک اسید حاصل از مرحله سوم در جدول ۶ آمده است. شکل ۸ اثر دمای آبکافت را بر ارزش اسیدی ترفتالیک اسید حاصل از مرحله سوم نشان می دهد (زمان ۵ h و غلظت اسید  $12\text{ M}$ ). با توجه به شکل ۸ ارزش اسیدی ترفتالیک اسید با افزایش دمای آبکافت افزایش می یابد، اما این افزایش در شرایط تعریف شده برای این پژوهش در محدوده خاصی از دمای آبکافت ( $130-140^{\circ}\text{C}$ ) افزایش می یابد و بعد از این محدوده دمایی با افزایش دما ارزش اسیدی ترفتالیک اسید تغییر محسوسی نمی کند و ثابت می ماند.



شکل ۶ نمودار تغییر ارزش اسیدی ترفتالیک اسید برحسب غلظت سولفوریک اسید.

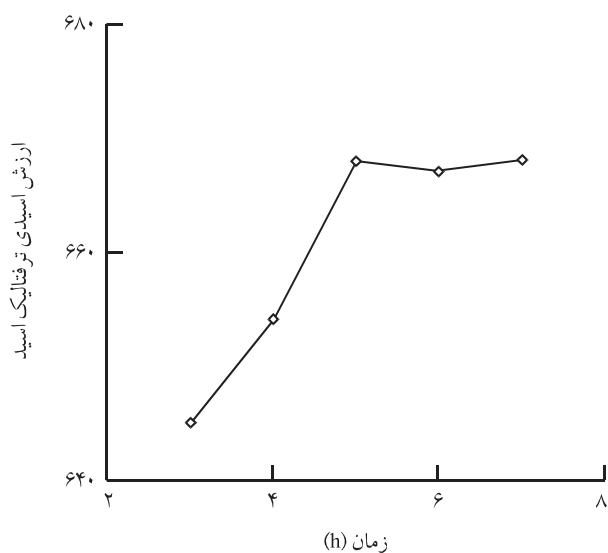


شکل ۷ نمودار تغییر ارزش اسیدی ترفتالیک اسید برحسب زمان.

( $150^{\circ}\text{C}$  و زمان ۵ h). همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود ارزش اسیدی در محدوده غلظت ۵ تا  $10\text{ M}$  سولفوریک اسید افزایش می یابد و پس از غلظت  $10\text{ M}$  ارزش اسیدی ترفتالیک اسید تغییر محسوسی نمی کند و ثابت می ماند.

#### اثر زمان آبکافت

جدول ۵ مقادیر ارزش اسیدی نمونه های ترفتالیک اسید حاصل از مرحله دوم (دمای  $150^{\circ}\text{C}$  و غلظت اسید  $12\text{ M}$ ) و شکل ۷ اثر زمان آبکافت را بر ارزش اسیدی ترفتالیک اسید حاصل از این مرحله نشان می دهد



شکل ۸ نمودار تغییر ارزش اسیدی ترفتالیک اسید برحسب زمان.

### بررسی ترفتالیک‌اسید حاصل به روش FTIR

شکل ۹ طیف FTIR نمونه ترفتالیک‌اسید حاصل از آبکافت را در مقایسه با نمونه خالص آن نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، طیف نمونه حاصل از آبکافت تمام نوارهای مربوط در نمونه خالص را در همان اعداد موجی دارد و هیچ‌گونه پیک اضافی مربوط به ناخالصیهای دیگر در آن مشاهده نمی‌شود.

در شکل ۱۰ طیف FTIR حاصل از یکی از نمونه‌های ترفتالیک‌اسید بازیافتی نشان داده شده است. ساختار مولکولی ترفتالیک‌اسید دارای گروه‌های عاملی هیدروکسیل و کربونیل است. این طیف وجود هر دو گروه عاملی را تأیید می‌کند بطوری که نوار مربوط به گروه هیدروکسیل در محدوده عدد موجی ۲۵۵۰ تا  $3000\text{ cm}^{-1}$  و نوار مربوط به گروه‌های کربونیل در عدد موجی  $1686\text{ cm}^{-1}$  مشاهده می‌شود.

### نتایج تجزیه عنصری

جدول ۷ نتایج تجزیه عنصری نمونه ترفتالیک‌اسید حاصل از بازیافت PET را که در شرایط بهینه غلظت ۱۲ M سولفوریک‌اسید، زمان ۵ h و دمای  $140^{\circ}\text{C}$  بدست آمده است به همراه مقایسه آن با نمونه خالص نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر مربوط به نمونه بازیافتی و نمونه خالص مشاهده می‌شود که نمونه بازیافتی محتوای کربن کمتری نسبت به نمونه خالص دارد. همچنین، مقادیر هیدروژن و اکسیژن نمونه بازیافتی از مقادیر مشابه در نمونه خالص بیشتر است.

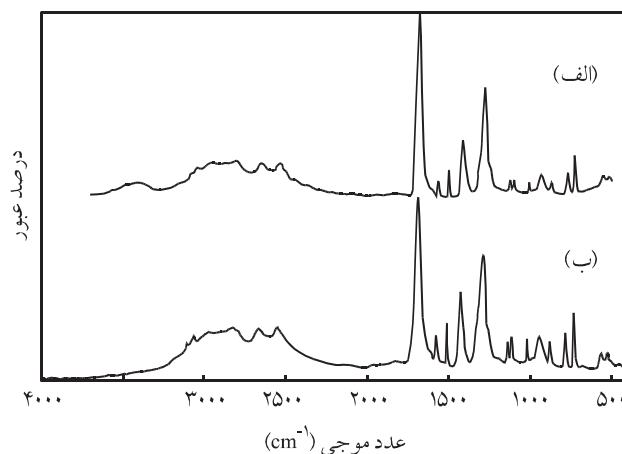
### نتیجه‌گیری

نتیجه متغیرهای فرایند آبکافت بدین ترتیب است:

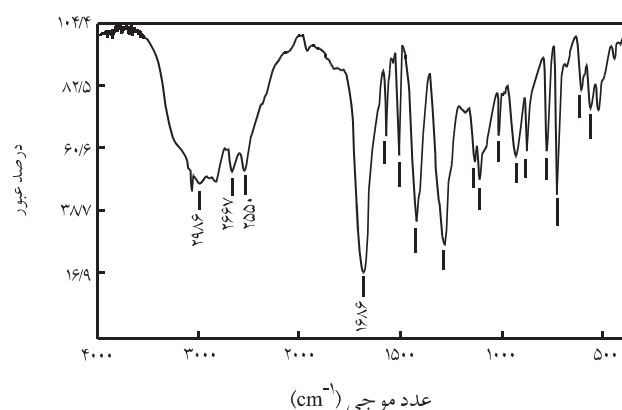
- افزایش غلظت سولفوریک‌اسید تعداد عوامل شیمیایی (پروتونهای هیدروژن) را افزایش داده، از این طریق بر تعداد برخوردها و متعاقب آن برخوردهای مؤثر می‌افزاید و در نهایت موجب افزایش مقدار تبدیل PET و بازده تولید مونومرها می‌شود.

- افزایش زمان آبکافت باعث فراهم شدن فرصت کافی برای برخوردها شده، از این راه تعداد برخوردهای بیشتری انجام می‌شود و شدت آبکافت افزایش می‌یابد.

- افزایش دما باعث افزایش تحرک عوامل شیمیایی (پروتونهای هیدروژن)، افزایش انرژی برخوردها و افزایش تعداد برخوردهای مؤثر در نتیجه افزایش مقدار آبکافت PET و متعاقب آن افزایش مقدار تبدیل PET می‌شود.



شکل ۹ طیف FTIR نمونه‌های ترفتالیک‌اسید: (الف) خالص و (ب) حاصل از آبکافت.



شکل ۱۰ طیف FTIR یکی از نمونه‌های ترفتالیک‌اسید بازیافتی.

جدول ۶ مقادیر ارزش اسیدی ترفتالیک‌اسید حاصل از مرحله سوم.

ارزش اسیدی ترفتالیک‌اسید	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )
۶۵۰	۱۳۰
۶۶۷	۱۴۰
۶۶۸	۱۵۰
۶۶۷	۱۶۰
۶۶۸	۱۷۰

جدول ۷ نتایج تجزیه عنصری نمونه ترفتالیک‌اسید بازیافتی در شرایط بهینه و مقایسه آن با نمونه خالص.

عنصر	نمونه خالص	نمونه بازیافتی
C	۵۷/۸۳	۵۴/۶
H	۳/۶۱	۳/۹۵
O	۳۸/۵۶	۴۱/۴۵

از دانه‌های PET در اندازه‌های  $2 \times 2/8$  mm استفاده شد و بازده  $94/1$  درصد برای بازیافت ترفتالیک اسید بدست آمد که این مقدار در مقایسه با سایر پژوهشهایی که اغلب از پودرهای PET در حد میکرون استفاده شده بسیار قابل ملاحظه است.

بنابراین، مقادیر بهینه متغیرهای فرایند، یعنی غلظت سولفوریک اسید  $12$  M، دمای  $140^\circ\text{C}$  و زمان  $5$  h بدست آمد. در این پژوهش، از حداقل تنوع واکنشگرهای شیمیایی استفاده شده است. ارزش اسیدی ترفتالیک اسید حاصل از این روش بسیار نزدیک به نمونه خالص است. همچنین،

## مراجع

- Oromiehie A.R., Effect of the Plastic Waste in Environment and the Importance of their Recycling, *Proceedings of the 7th National Iranian Chemical Engineering Conference*, University of Tehran, Tehran, Iran, 275, 8-13 October, 2002.
- Oromiehie A.R. and Mamizadeh A., Recycling PET Beverage Bottles and Improving its Properties, *Polym. Int.*, **53**, 728-732, 2004.
- Seo K. and Cloyd J.D., Kinetic of Hydrolysis and Thermal Degradation of Polyester Melts, *J. Appl. Polym. Sci.*, **42**, 845-850, 1991.
- Mishra S. and Goje A.S., Kinetics of Glycolysis of Polyethylene Terephthalate Waste Powder at Moderate Pressure and Temperature, *J. Appl. Polym. Sci.*, **87**, 1569-1573, 2003.
- Mishra S. and Goje A.S., Kinetic and Thermodynamic Study of Methanolysis of Polyethylene Terephthalate Waste Powder, *Polym. Int.*, **52**, 337-342, 2003.
- Mishra S., Goje A.S. and Zope V.S., Chemical Recycling, Kinetic and Thermodynamic Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate Waste in Sulfuric Acid in Presence of Phosphoric Acid, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **42**, 581-603, 2003.
- Mishra S., Goje A.S. and Zope V.S., Chemical Recycling, Kinetic and Thermodynamic Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate Waste Powder by Nitric Acid, *Polym. Reaction Eng.*, **11**, 79-99, 2003.
- Yoshioka T., Sato T.G. and Okuwaki A.T., Hydrolysis of Waste PET by Sulfuric Acid at  $150^\circ\text{C}$  for Chemical Recycling, *J. Appl. Polym. Sci.*, **52**, 1353-1355, 1994.
- Campanelli J.R., Cooper D.G. and Kamal M.R., Catalyzed Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate Melt, *J. Appl. Polym. Sci.*, **53**, 985-991, 1994.
- Hu L.C., Oku A. and Koheitomari E.Y., Alkali-Decomposition of Polyethylene Terephthalate in Mixed Media of Nonaqueous Alcohol and Ether; Study on Recycling of Polyethylene Terephthalate, *Polym. J.*, **29**, 708-712, 1997.
- Reson B.I., Preparation of Purified Terephthalic Acid from Waste Polyethylene Terephthalate, *US Pat. 5,095,145*, 1992.
- Pusztaszeri S.F., Method for Recovery of Terephthalic Acid from Polyester Scrap, *US Pat. 4, 355,175*, 1982.