

# بازیافت مونومر استیرن از تخریب گرمایی پلی استیرن

## Styrene Monomer Recovering from Thermal Degradation of Polystyrene

محمد رضا عبدالمهی مقدم\*

مشهد، پارک علم و فناوری خراسان، صندوق پستی ۹۱۷۳۵/۱۳۹

دریافت: ۸۵/۴/۲۶، پذیرش: ۸۵/۸/۱۹

### چکیده

در این پژوهش، دو نوع پلی استیرن پرمصرف مورد استفاده برای ساخت ظروف یک بار مصرف شامل پلی استیرن معمولی و پلی استیرن فشرده، در معرض تخریب گرمایی قرار گرفتند. واکنشهای تخریب در مجاورت کاتالیزورهایی مانند سولفاتهای فلزی آبدار و بدون آب، اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی در دماهای  $250^{\circ}\text{C}$  -  $280^{\circ}\text{C}$  انجام شد و محصول مونومر خام استیرن بدست آمد. به منظور دستیابی به شرایط بهینه واکنش، اثر عواملی مانند نوع کاتالیزور، درصد کاتالیزور، دما، نوع ماده اولیه و کاربرد فشار کم بر بازده واکنش تخریب بررسی شد. بازده واکنش در بهترین شرایط، ۸۷ درصد بود. بررسی نتایج آزمایشها نشان می دهد که انجام واکنش تخریب گرمایی در شرایط فشار کم، بازده واکنش را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد.

### واژه های کلیدی

تخریب گرمایی، پلی استیرن،  
استیرن، واپلیمرشدن، بازیافت

### مقدمه

کشورها طیف وسیعی از مواد لبنی نظیر ماست، پنیر، خامه و بستنی در ظروف پلی استیرنی به بازار مصرف عرضه می شوند. بلوکهای پلی استیرنی با نام استیروفوم برای عایق کاری ساختمانها و تجهیزات سرمایشی و نیز اسفنجهای پلی استیرنی به عنوان پرکننده و

رزینهای پلی استیرن از جمله پلاستیکهای صنعتی هستند که به دلیل قالب پذیری خوب و قیمت مناسب، مورد توجه زیادی بوده و دامنه کاربرد آنها رو به افزایش است. به ویژه در صنعت بسته بندی تمایل زیادی به استفاده از مواد پلی استیرنی وجود دارد. در بسیاری از

\* مؤلف مسئول مکاتبات، پیام نگار: abdollahi@kstp.ir

### Key Words

thermal degradation, polystyrene,  
styrene, depolymerization, recovering

بازده باز یافت استیرن (۵۴ درصد) انجام شده است [۲]. بازده باز یافت استیرن در پژوهشی که واکنشهای تخریب در غیاب اکسیژن، در دماهای حدود  $450^{\circ}\text{C}$ - $500^{\circ}\text{C}$  و در مجاورت کاتالیزور اکسید فلزی انجام شده، ۷۵-۷۰ درصد بوده است [۳]. در این پژوهش، واکنشهای تخریب گرمایی در محدوده دمایی  $350^{\circ}\text{C}$ - $280^{\circ}\text{C}$  انجام و برای اولین بار اثر کاربرد فشار کم بر بازده واکنشها بررسی شد. نتایج آزمایشها نشان دهنده افزایش قابل توجه بازده واکنش در فشار کم و نیز شفافیت رنگ محصول مونومر خام بدست آمده است.

## تجربی

### مواد

در این پژوهش، از مخلوط دانه‌های نو پلی استیرن معمولی و پلی استیرن فشرده محصول شرکت پتروشیمی تبریز با نسبت وزنی یکسان و نیز مخلوط پرک تمیز شده ظروف کدر، شفاف و اسفنج پلی استیرنی استفاده شده است. همچنین، تمام کاتالیزورهای مورد استفاده در واکنشها، محصول شرکت مرک هستند.

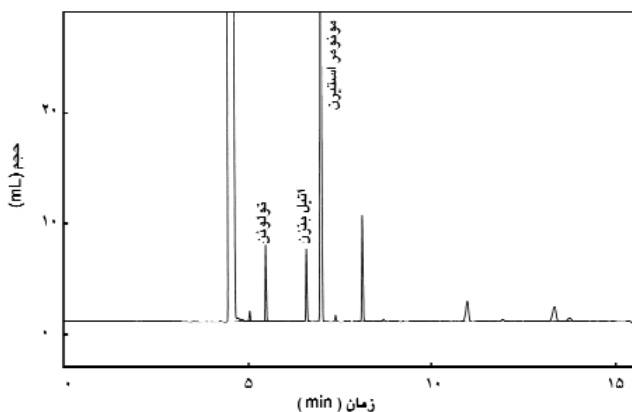
### دستگاهها

دستگاه گاز کروماتوگرام مدل Shimadzu-17A برای تجزیه نمونه‌های خام مونومر استیرن بدست آمده طی واکنشها، بکار گرفته شد.

### روشها

به منظور بررسی اثر عوامل مختلف از جمله نوع کاتالیزور، درصد کاتالیزور، دما، نوع ماده اولیه و کاربرد فشار کم بر بازده واکنش واپلیمردن پلی استیرن و تعیین شرایط بهینه واکنش، ۵۰ g ماده اولیه (دانه نو پلی استیرن) وارد مخزن سامانه تخریب (عبارت از بالن ۵۰۰ mL سه دهانه شیشه‌ای مجهز به دماسنج و همزن) شد، سپس مقدار مشخصی کاتالیزور به آن اضافه شد. مخلوط تا دمای حدود  $250^{\circ}\text{C}$  گرم شد (در این دما پلی استیرن ذوب شد)، آنگاه مخلوط ضمن ادامه گرمادهی به وسیله همزن، همزده شد. بخارات حاصل از تخریب که به طور عمده شامل مونومر استیرن، تولوئن و اتیل بنزن است، در چگالنده متصل به بالن، متراکم و مایع شد که در نهایت محصول مونومر خام استیرن جمع‌آوری شد. با تقطیر در خلأ مونومر خام استیرن، مونومر با خلوص زیاد بدست آمد. شایان ذکر است که در اغلب آزمایشها، ماده اولیه، شامل مخلوط ۲۵ g دانه پلی استیرن شفاف (GPPS) و ۲۵ g دانه

محافظت کننده در بسته‌بندیها به مقدار زیادی استفاده می‌شوند. مواد پلی استیرنی ضایعاتی همچون سایر محصولات پلاستیکی، پس از دفع به دلیل اینکه با عوامل محیطی به راحتی تجزیه نمی‌شوند، مشکلات زیست محیطی زیادی را بوجود می‌آورند. اسفنجهای پلی استیرنی علاوه بر حجیم بودن، در شرایط دفن در خاک تجزیه نمی‌شوند. با توجه به موارد یاد شده و نیز به لحاظ ارزش اقتصادی، موضوع باز یافت پلاستیکها سالهاست که جایگاه ویژه‌ای را در کشورهای مختلف دنیا به خود اختصاص داده است. پلاستیکهای ضایعاتی، از جمله پلی استیرنهای ضایعاتی به روشهای مکانیکی و شیمیایی بازیابی می‌شوند. پژوهشهای زیادی روی باز یافت شیمیایی پلی استیرنهای ضایعاتی به منظور دستیابی به هیدروکربنهای آروماتیک، به ویژه مونومر استیرن انجام شده است [۱۱-۱]. مواد بازیافتی، برای ساخت پلاستیکها یا به عنوان مواد اولیه برای تهیه سایر مواد استفاده می‌شوند. واکنشهای تخریب گرمایی پلی استیرن با کاتالیزورها و بدون آن انجام شده است. طی فرایند تخریب گرمایی ساده، هنگامی که پلی استیرن گرم می‌شوند (بالتر از دمای ذوب آنها)، زنجیرهای پلیمری از محلهای تصادفی شکسته شده، رادیکالها تولید می‌شوند. سپس، رادیکالها با انتقالهای بین مولکولی، درون مولکولی و فرایند واپلیمردن شدن زنجیرهای پلیمری کوتاهتر، تترامر، دیمرو در نهایت مونومر (استیرن) و سایر مواد را ایجاد می‌کنند [۱۲]. همچنین، وجود کاتالیزورها در محیط واکنش، فرایندهای تخریب گرمایی را به روشهای مختلف تحت تاثیر قرار می‌دهند، اثر پودر فلزات عناصر واسطه (به عنوان کاتالیزور واکنش) بر افزایش بازده باز یافت استیرن، به کاهش انرژی فعال سازی ظاهری واکنش تخریب گرمایی نسبت داده شده است [۱]. در پژوهشی، واکنش تخریب در مجاورت کاتالیزورهای ژئولیتی با تشکیل یونهای کربن انجام شده است [۱۳]. اغلب پژوهشهای گذشته در زمینه تخریب گرمایی پلی استیرنهای ضایعاتی در دماهای زیاد و در محدوده  $430^{\circ}\text{C}$ - $350^{\circ}\text{C}$  انجام شده است که با اجرای طرح در مقیاس صنعتی، این امر موجب افزایش قیمت تمام شده محصول به دلیل ضرورت استفاده از تجهیزات ویژه مقاوم در دماهای زیاد می‌شود. همچنین در پژوهشهای پیشین، مقدار استیرن در محصول مونومر خام استیرن بندرت از محدوده ۷۹ - ۶۰ درصد فراتر رفته است. واکنشهای تخریب گرمایی در مجاورت کاتالیزورهای پودر فلزات عناصر واسطه و در دمای  $420^{\circ}\text{C}$  نیز انجام شده است و حداکثر بازده باز یافت استیرن، ۵۸/۲ درصد و مربوط به استفاده از پودر آلومینیم به عنوان کاتالیزور بوده است [۱]. واکنشهای تخریب گرمایی همچنین در مجاورت کاتالیزور آلومینیم هیدروکسید فعال شده با دستیابی به حداکثر



شکل ۱ رنگ نگار مربوط به آزمایش ۱۵.

کیلویی حدود ۸۰۰ ریال است، بنابراین استفاده از کلسیم اکسید تجاری به عنوان کاتالیزور واکنش، مناسبتر است. همچنین، استفاده از منیزیم سولفات خشک به جای منیزیم سولفات آبدار بازده بازیافت استیرن را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. قابل ذکر است که به منظور بررسی اثر آبدار بودن کاتالیزور بر بازده واکنش، برای تعدادی از کاتالیزورها مانند آهن سولفات و منگنز سولفات نیز آزمایشهای مشابهی انجام شد که نتایج بدست آمده نشان می‌دهد استفاده از کاتالیزور خشک به جای کاتالیزور

جدول ۱ انواع کاتالیزورهای مورد استفاده در واکنشها و بازده بدست آمده در شرایط دمایی  $30^{\circ}\text{C}$  و  $320^{\circ}\text{C}$  درصد کاتالیزور.

شماره آزمایش	نام کاتالیزور	مقدار مونومر خام بدست آمده (g)	مقدار استیرن موجود در مونومر خام (%)	بازده بازیافت (%)
۱	آهن سولفات	۲۴/۷۷	۴۴/۷۲	۲۴/۳
۲	روی سولفات	۲۲/۴	۵۰/۸۱	۲۵
۳	سدیم سولفات	۲۷/۳	۶۱/۰۳	۳۶/۵
۴	منگنز سولفات	۳۱/۴۱	۵۳/۵۲	۳۶/۹
۵	کلسیم سولفات	۲۹/۷۵	۵۷/۸۷	۳۷/۸
۶	منیزیم سولفات خشک	۲۹/۳	۶۰/۳۲	۳۸/۸
۷	منیزیم سولفات آبدار	۳۴/۵۱	۴۴/۸۳	۳۳/۹۳
۸	منیزیم اکسید	۳۵/۸۴	۵۵/۰۹	۴۳/۳
۹	کلسیم اکسید	۳۱/۷۵	۶۴/۲۲	۴۴/۷
۱۰	منیزیم هیدروکسید	۲۹/۳	۶۰/۳۲	۳۸/۸

پلی استیرن کدر (HIPS) بود. از آنجا که مطابق تجزیه دو نوع پلی استیرن یاد شده، GPPS دارای ۹۵/۲۳ درصد پلی استیرن و HIPS دارای ۸۷/۰۹ درصد پلی استیرن است، بنابراین حداکثر مقدار بازیافت مونومر استیرن حاصل از واپلیمر شدن ۵۰ g مخلوط دانه‌های یاد شده مطابق معادله (۱) محاسبه شد:

$$25 \times 0.9523 + 25 \times 0.8709 = 45/6 \quad (1)$$

همچنین، در پایان هر آزمایش مقدار مونومر خام (M) بدست آمده توزین و مقداری از آن نیز برای تعیین درصد استیرن موجود (Y) با دستگاه GC بررسی شد. بازده واکنش از معادله (۲) محاسبه شد:

$$\text{درصد بازده واکنش} = \frac{M \times Y}{45/6} \quad (2)$$

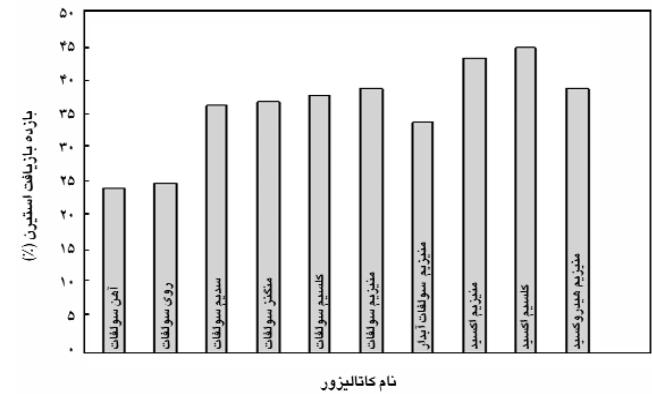
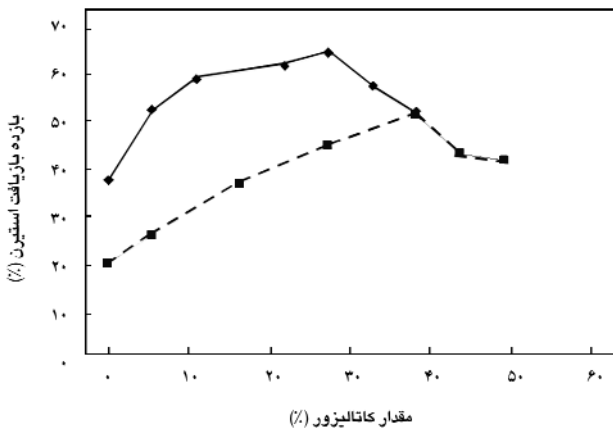
رنگ نگار مربوط به آزمایش ۱۵، در شکل ۱ آمده است.

## نتایج و بحث

### بررسی اثر نوع کاتالیزور بر بازده واکنش

به منظور بررسی اثر نوع کاتالیزور بر بازده واکنش، با توجه به این موضوع که برای افزایش بازده و نیز تسریع واکنش واپلیمر شدن پلی استیرن، اغلب از کاتالیزورهایی مانند سولفاتهای معدنی خشک و آبدار، اکسیدهای فلزی و نیز هیدروکسیدهای فلزی استفاده می‌شود [۳-۵] و همچنین با انجام آزمایشهای متعدد مشخص شد برای تعداد زیادی از کاتالیزورها، بازده بازیافت استیرن در مقدار ۳۰ درصد کاتالیزور (معادل ۱۵ g به نسبت ۵۰ ماده اولیه) بیشترین مقدار است. بنابراین، تعداد ۱۰ آزمایش در شرایط یکسان (دمای  $320^{\circ}\text{C}$  و مقدار ۳۰ درصد کاتالیزور) برای کاتالیزورهای مختلف انجام و بازده مربوط به هر واکنش محاسبه شد. نتایج حاصل در جدول ۱ و شکل ۲ آمده است.

همان طور که از نتایج جدول ۱ و شکل ۲ مشاهده می‌شود، بازده بازیافت استیرن در شرایط واکنشها، هنگام استفاده از کاتالیزور کلسیم اکسید بیشترین مقدار است (۴۴/۷ درصد). اگر چه بازده بازیافت هنگام استفاده از منیزیم اکسید به عنوان کاتالیزور نزدیک به بازده یاد شده است (۴۳/۳ درصد)، اما از آنجا که کلسیم اکسید (آهک) با قیمت تجاری کیلویی حدود ۳۰۰ ریال بسیار ارزانتر از منیزیم اکسید با قیمت تجاری



شکل ۲ بازده باز یافت استیرن برای کاتالیزورهای مختلف در شرایط دمایی 320°C و استفاده از 30 درصد کاتالیزور.

شکل ۳ اثر درصد کاتالیزورهای مختلف بر بازده باز یافت استیرن: (◆) کلسیم اکسید در دمای 350°C و (■) منیزیم سولفات در دمای 320°C.

آبدار موجب افزایش بازده واکنش می شود.

جدول ۲، برای منیزیم سولفات در دمای 320°C در جدول ۳ و برای هر دو کاتالیزور در شکل ۳ آورده شده است.

همان طور که از نتایج جداول ۲ و ۳ و شکل ۳ مشاهده می شود، بازده باز یافت استیرن برای کلسیم اکسید در 30 درصد و برای منیزیم سولفات در 40 درصد بیشترین مقدار است. قابل ذکر است که با توجه به توجیه اقتصادی انجام شده برای احداث یک واحد باز یافت ظروف یک بار مصرف پلی استیرنی با ظرفیت تولید سالانه 600 تن مونومر خام استیرن با خلوص حدود 70 درصد، قیمت تمام شده تولید یک کیلوگرم از این ماده (محاسبات توجیه اقتصادی بدون باز یافت کاتالیزور کلسیم اکسید انجام شده است) حدود 4000 ریال است (قیمت جهانی هر کیلوگرم مونومر

### بررسی اثر درصد کاتالیزور بر بازده واکنش

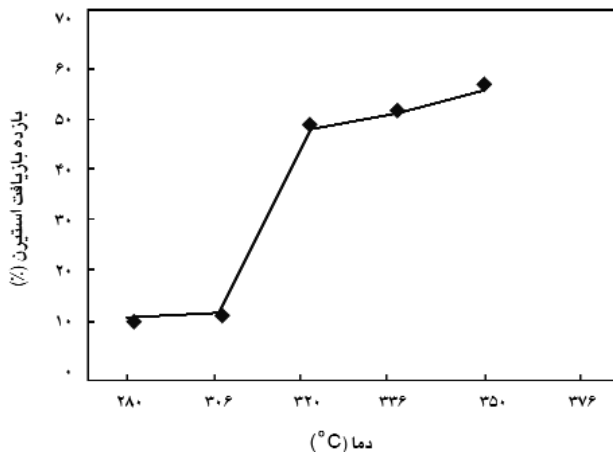
برای بررسی اثر درصد کاتالیزور مورد استفاده (نسبت به ماده اولیه یعنی پلی استیرن) بر بازده باز یافت استیرن، آزمایشهایی با درصدهای مختلف (0، 5، 10، 15، 20، 30، 35، 40، 45 و 50) از کاتالیزورها انجام شد. نتایج بدست آمده برای کاتالیزورهای یاد شده در جدول ۱ نشان می دهد که برای کاتالیزورهای کلسیم اکسید، منگنز سولفات و منیزیم هیدروکسید، بازده باز یافت استیرن در 30 درصد کاتالیزور بیشترین مقدار است. برای سایر کاتالیزورها بیشترین بازده واکنش، در مقدار 40 درصد کاتالیزور است. نتایج بدست آمده برای کاتالیزور کلسیم اکسید در دمای 350°C در

جدول ۳ بازده باز یافت استیرن در درصدهای مختلف کاتالیزور منیزیم سولفات و دمای 320°C.

بازده باز یافت (%)	مقدار استیرن موجود در مونومر خام (%)	مقدار مونومر خام بدست آمده (g)	درصد کاتالیزور	شماره آزمایش
18/27	54/36	15/33	0	18
24/21	59/29	18/62	5	19
34/63	62/08	25/44	15	20
42/38	64/33	30/04	30	21
48/60	67/30	32/93	40	22
40/53	61/08	30/26	45	23
39/47	64/09	28/08	50	24

جدول ۲ بازده باز یافت استیرن در درصدهای مختلف کاتالیزور کلسیم اکسید و دمای 350°C.

بازده باز یافت (%)	مقدار استیرن موجود در مونومر خام (%)	مقدار مونومر خام بدست آمده (g)	درصد کاتالیزور	شماره آزمایش
35/45	57/49	28/12	0	11
49/94	66/27	34/37	5	12
56/07	67/71	37/76	10	13
58/75	71/31	37/57	20	14
61/55	71/15	39/45	30	15
54/82	70/58	35/42	35	16
49/46	68/57	32/89	40	17



شکل ۴ اثر دما بر بازده بازیافت استیرین با ۳۰ درصد کلسیم اکسید.

$$35 \times 0.18709 + 7.5 \times 0.9523 + 7.5 \times 0.9173 = 44.5$$

بنابراین بازده بازیافت استیرین برای آزمایش ۳۰ عبارتست از:

$$\frac{32 / 45 \times 70 / 31}{44.5} = 51.27$$

ظروف اسفنج پلی استیرین ضایعاتی تمیز که دارای ۹۱/۷۳ درصد پلی استیرین است، ابتدا در دمای حدود ۲۰۰°C ذوب شدند و پس از سرد شدن ۷/۵ g از آن برای آزمایش ۳۰ استفاده شد. همچنین، بازده بازیافت استیرین حاصل از واپلیم شدن مخلوط ۲۵ دانه کدر و ۲۵ دانه شفاف پلی استیرین مشابه شرایط آزمایش ۳۰، برابر ۶۱/۵۵ درصد است (آزمایش ۱۵). با توجه به اینکه مخلوط ظروف نسبت به مخلوط دانه‌ها، ناخالصی (مانند رنگ) و درصد مواد غیر پلی استیرینی بیشتری دارد، بنابراین تفاوت میان دو بازده قابل توجه است.

#### بررسی اثر کاربرد فشار کم بر بازده واکنش

به منظور بررسی اثر کاربرد فشار کم بر بازده واکنش، آزمایش ۳۱ در شرایط مشابه با آزمایش ۱۵ و آزمایش ۳۲ در شرایط مشابه آزمایش ۳۰ همراه با ایجاد شرایط فشار کم به مقدار ۱۰۰ mmHg در محیط واکنشها انجام شد. بازده بازیافت استیرین برای آزمایشهای ۳۱ و ۳۲ به ترتیب ۸۴/۱ و ۶۷/۸ درصد بدست آمد. در هر دو مورد ملاحظه می شود که کاربرد فشار کم اثر قابل توجهی بر افزایش بازده بازیافت استیرین دارد.

جدول ۴ بازده بازیافت استیرین در دماهای مختلف برای ۳۰ درصد کلسیم اکسید.

شماره آزمایش	دما (°C)	مقدار مونومر خام بدست آمده (g)	مقدار استیرین موجود در مونومر خام (%)	بازده بازیافت (%)
۲۵	۲۸۰	۱۰/۰۵	۴۹/۰۸	۱۰/۸
۲۶	۳۰۶	۱۶/۹۹	۳۱/۵۵	۱۱/۷۶
۲۷	۳۲۰	۳۴/۷۶	۶۱/۴۸	۴۶/۸۶
۲۸	۳۳۶	۳۸/۸۲	۶۵/۸۷	۵۶/۰۸
۲۹	۳۵۰	۳۹/۴۵	۷۱/۱۵	۶۱/۵۵

استیرین با خلوص ۹۹/۸ درصد در حال حاضر حدود ۴۰۰۰ ریال است) به نظر می رسد که طرح تولیدی بر مبنای اطلاعات ارائه شده از توجیه اقتصادی مناسبی برخوردار است. اما، راهکار برای کاهش قیمت تمام شده تولید محصول، بازیافت کاتالیزور کلسیم اکسید است.

#### بررسی اثر دما بر بازده واکنش

به منظور بررسی اثر دما بر بازده واکنش، آزمایشهایی در دماهای مختلف با ۳۰ درصد کلسیم اکسید انجام شد که نتایج بدست آمده در جدول ۴ و شکل ۴ آورده شده است. مطابق نتایج بدست آمده با افزایش دما، بازده بازیافت استیرین افزایش می یابد. اما، با توجه به اینکه در دماهای زیاد افزایش بازده ناچیز است و انجام واکنش در دماهای زیاد، موجب افزایش قیمت تجهیزات و در نتیجه افزایش قیمت تمام شده محصول نهایی می شود. بنابراین دمای ۳۵۰°C، مناسبترین دما برای واکنش است.

#### بررسی اثر نوع ماده اولیه بر بازده واکنش

برای بررسی اثر نوع ماده اولیه (پلی استیرین) بر بازده واکنش، آزمایشهای متعددی با کاتالیزور کلسیم اکسید انجام شد. مخلوط ۳۵ g پرک تمیز شده ظروف کدر پلی استیرین ضایعاتی آسیایی، ۷/۵ g پرک ظروف شفاف پلی استیرین و ۷/۵ g ظروف اسفنج پلی استیرین (به نسبت ۱:۱:۱ که این نسبت تقریباً برابر نسبت واقعی ظروف ضایعاتی پلی استیرین جمع آوری شده و وسیله سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری است) در مجاورت ۳۰ درصد کلسیم اکسید در دمای ۳۵۰°C در معرض واکنش واپلیم شدن قرار گرفت (آزمایش ۳۰)، در نتیجه مقدار ۳۲/۴۵ g محصول مونومر خام استیرین با ۷۰/۳۱ درصد استیرین بدست آمد. حداکثر مقدار بازیافت استیرین حاصل از واپلیم شدن ۵۰ g مخلوط یاد شده عبارتست از:

## نتیجه‌گیری

کلسیم اکسید (به دلیل حصول بازده بازیافت استیرن بیشتر و نیز قیمت کمتر در میان کاتالیزورهای مورد آزمایش) منجر به دستیابی به بازده بازیافت استیرن بیشتر می‌شود. همچنین، انجام واکنش در شرایط فشار کم، بازده بازیافت استیرن را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد.

در این پژوهش، با انجام آزمایشهای مختلف مشخص شد که واکنش تخریب گرمایی پلی استیرن در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  و در مجاورت ۳۰ درصد

## مراجع

1. Guoxi Xi., Rui L., Qinhu T. and Jinghua Li., Mechanism Studies on the Catalytic Degradation of Waste Polystyrene into Styrene in the Presence of Metal Powders, *Appl. Polym. Sci.*, **73**, 1139-1143, 1999.
2. Xianchun Y., Xuerong Z. and Yang J., Catalyst for Catalytic Degradation of Waste Polystyrene Plastics into Styrene, *CN Pat. 1,133,858*, 1996.
3. Luo X., Yie F. and Tan W., A Method for Recovering Styrene Monomer from Discarded Polystyrene Scrap through Pyrolytic Reduction, *GB Pat. 2,228,493*, 1990.
4. Guyot A., Recent Developments in the Thermal Degradation of Polystyrene-A Review, *Polym. Degrad. Stab.*, **15**, 219-235, 1986.
5. Ide S., Ogawa T., Kuroki T. and Ikemura T., Controlled Degradation of Polystyrene, *J. Appl. Polym. Sci.*, **29**, 2561-2571, 1984.
6. Ohtani H., Yuyama T., Tsuge S., Plage B. and Schulten H., Study on Thermal Degradation of Polystyrenes by Pyrolysis-gas Chromatography and Pyrolysis-field Ionization Mass Spectrometry, *Eur. Polym. J.*, **26**, 893-899, 1990.
7. Woo O., Ayala N. and Broadbelt L., Mechanistic Interpretation of Base-catalyzed Depolymerization of Polystyrene, *Catal. Today*, **55**, 161-171, 2000.
8. Sato T. and Masunari M., Method for Recovering Styrene Monomer from Polystyrene Resin by Using a Catalyst, *US Pat. 6,380,448*, 2002.
9. Isao M., Yasuo T., Hideuki O. and Takashi O., Method for Pyrolyzing Styrene Resin, *Jpn. Pat. 8,283,745*, 1996.
10. Yoshihisa K., Kenji S. and Hajime O., Liquefaction of Plastic, *Jpn. Pat. 9,221,681*, 1997.
11. Hajime O., Kenji S. and Yoshihisa K., Conversion of Plastic into Oil, *Jpn. Pat. 9,302,356*, 1997.
12. McNeill I.C., Zulfiqar M. and Kousar T., A Detailed Investigation of the Products of the Thermal Degradation of Polystyrene, *Polym. Degrad. Stab.*, **28**, 131-151, 1990.
13. Zhang Z., Ohkita H. and Okada M., Chemical Recycling of Waste Polystyrene over Solid and Bases, *Ind. Eng. Res.*, **34**, 4514-4519, 1995.