

کمپلکس نیکل(II) سالن نامتقارن تثبیت شده درون سیلیکای مزومتخلخل سه بعدی KIT-6 به عنوان یک کاتالیست ناهمگن کارآمد در اکسایش انتخابی هیدروکربن‌ها

مهدی هاتفی اردکانی* و زینب محمدآبادی

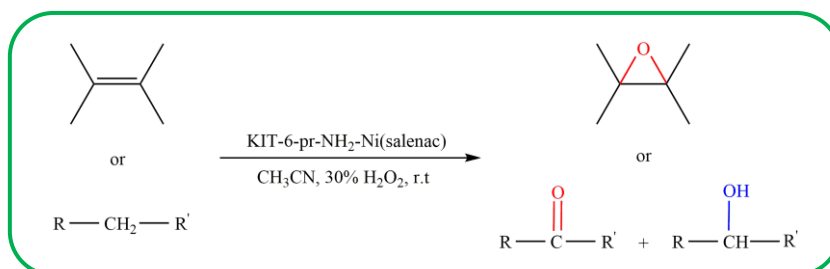
گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

تاریخ پذیرش: ۲۴ اسفند ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۲ بهمن ۱۴۰۲

چکیده: در این پژوهش، فعالیت کاتالیستی کمپلکس نیکل(II) حاوی لیگاند باز شیف سالن نامتقارن چهاردندانه سالیسیلیدین ایمینو اتیل ایمینوپنتان-۲-اون ($H_2salenac$)، تثبیت شده درون سیلیکای مزومتخلخل سه بعدی KIT-6، ($KIT-6-pr-NH_2-Ni(salenac)$)، در واکنش اپوکسایش آلکن‌ها و اکسایش آلکن‌ها با استفاده از اکسیژن‌دهنده هیدروژن پراکسید ۳۰ درصد مطالعه شد. ابتدا، تاثیر عوامل مختلف مانند نوع حلال، مقدار کاتالیست و نوع اکسیژن‌دهنده بررسی و با توجه به نتایج به دست آمده، استونیتریل و هیدروژن پراکسید، به ترتیب به عنوان بهترین حلال و بهترین اکسیژن‌دهنده انتخاب شدند. همچنین، مقدار بهینه کاتالیست برای انجام واکنش، ۱۰۰ میلی‌گرم (۰/۰۱۶ میلی‌مول، براساس نیکل موجود در کاتالیست) تعیین شد. نتایج به دست آمده نشان داد که این کاتالیست توانایی بالایی در کاتالیز کردن واکنش اپوکسایش آلکن‌ها و اکسایش آلکن‌ها و تولید محصول با بازده بالا در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) دارد. همچنین این کاتالیست از پایداری بالایی در محیط واکنش برخوردار بود و تا ۵ مرحله قابلیت بازیابی و استفاده دوباره را دارد.

کلید واژه: اکسایش، باز شیف نامتقارن، کمپلکس نیکل(II)، کاتالیست ناهمگن، هیدروکربن



۱- مقدمه

اکسایش هیدروکربن‌ها، به ویژه اپوکسایش آلکن‌ها و اکسایش آلکن‌ها، یک واکنش اساسی در شیمی می‌باشد که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. اکسایش ترکیب‌های آلی با استفاده از اکسیدهای معدنی گران قیمت و همچنین خطرناک برای محیط‌زیست مانند پتاسیم پرمنگنات، سدیم هیپوکلریت و نیتریک اسید، انتخابی نبوده و منجر به تشکیل محصولات ناخواسته می‌شود [۱]. بنابراین، اکسایش انتخابی هیدروکربن‌ها با اکسیدهای ارزان و دوستدار محیط‌زیست مانند هیدروژن پراکسید و اکسیژن مولکولی در حضور کمپلکس‌های فلزات واسطه به عنوان کاتالیست، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲-۴].

کمپلکس‌های فلزات واسطه با لیگاندهای باز شیف، کاتالیست‌های همگن کارآمدی در اکسایش ترکیب‌های آلی با

استفاده از اکسیدهای مختلف هستند [۵-۷]. فعالیت کاتالیستی خوب و گزینش‌پذیری بالا به عنوان برتری‌های اصلی کمپلکس‌های فلزی به عنوان کاتالیست‌های همگن گزارش شده است. با این حال، فعالیت کاتالیست‌های همگن با گذشت زمان در نتیجه غیرفعال شدن کاتالیست از طریق تولید گونه‌های دیمری اکسو و پراکسو کاهش می‌یابد. علاوه بر این، بازیابی کاتالیست‌های همگن از محیط واکنش دشوار است [۸].

کاتالیست‌های ناهمگن در مقایسه با کاتالیست‌های همگن، برتری‌های متعددی مانند پایداری بالاتر، جداسازی آسان کاتالیست از مخلوط واکنش و محافظت از کاتالیست در برابر تخریب دارند [۹]. تثبیت کاتالیست‌های همگن بر روی تکیه‌گاه‌های جامد، یک رویکرد مناسب برای تهیه کاتالیست‌های ناهمگن و تلفیق برتری‌های کاتالیست‌های همگن و ناهمگن است [۱۰].

فوری به وسیله دستگاه طیف‌سنج ترمو ساینیتیفیک مدل نیکولت آی‌اس ۱۰ و با استفاده از قرص KBr خشک در محدوده ۴۰۰ تا 4000 cm^{-1} ثبت شدند. پیشرفت و بازده واکنش‌ها با دستگاه کروماتوگرافی گازی فیلپس مدل پی‌یو ۴۶۰۰ مجهز به ستون سیلیکون DC-200 با طول دو متر و آشکارساز یونش شعله‌ای دنبال شد. مقدار فلز نیکل موجود در کاتالیست با روش پلاسمای جفت شده القایی و با استفاده از دستگاه اسپکتروسایروس سی‌سی‌دی برابر با ۰/۱۶ میلی‌مول بر گرم کاتالیست تعیین شد.

۲-۲- روش کار عمومی برای اکسایش هیدروکربن‌ها در حضور کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac)

در یک بالن ته‌گرد ۲۵ میلی‌لیتری، مجهز به یک کندانسور، مخلوطی از ۱ میلی‌مول آلکن (با آلکان) و ۰/۱۶ میلی‌مول (۱۰۰ میلی‌گرم) KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) به عنوان کاتالیست در ۴ میلی‌لیتر استونیتریل تهیه شد. سپس، ۲ میلی‌مول (۲۰۵ میکرولیتر) هیدروژن پراکسید ۳۰ درصد به مخلوط بالا اضافه و مخلوط واکنش با همزن مغناطیسی در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) به هم زده شد. پیشرفت واکنش و میزان تولید محصول با کروماتوگرافی گازی دنبال شد. پس از اتمام واکنش، مخلوط واکنش صاف و کاتالیست با ۲۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان به طور کامل شسته و در آن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت خشک گردید.

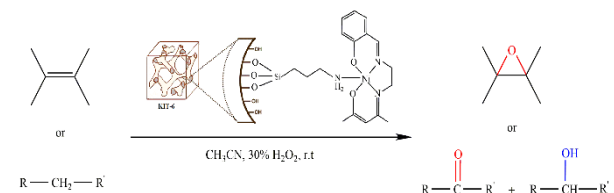
۳- بحث و نتایج

برای ارزیابی فعالیت KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) در اپوکسایش آلکن‌ها، ابتدا اپوکسایش سیکلواکتن به عنوان واکنش نمونه، برای بررسی اثر نوع حلال، مقدار کاتالیست و نوع اکسیژن‌دهنده بر فعالیت کاتالیست مطالعه شد. سپس در شرایط بهینه، اپوکسایش آلکن‌های مختلف در حضور کاتالیست بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده (جدول ۱، ردیف‌های ۵-۱)، واکنش اپوکسایش سیکلواکتن با هیدروژن پراکسید در غیاب کاتالیست فقط ۸ درصد بازده داشت، اما در حضور کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) و با افزایش مقدار آن، این بازده افزایش یافت. زیرا با افزایش مقدار کاتالیست، جایگاه‌های فعال کاتالیستی که باعث برهمکنش مولکول‌های آلکن و اکسیژن‌دهنده می‌شوند، افزایش می‌یابد. در این سامانه کاتالیستی، مقدار ۰/۱۶ میلی‌مول (۱۰۰ میلی‌گرم) کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac)، بیشترین بازده را در اپوکسایش سیکلواکتن نشان داد. در ضمن بازده واکنش اپوکسایش سیکلواکتن در حضور کمپلکس نیکل (II) بازشیف به عنوان کاتالیست همگن بسیار کمتر از بازده واکنش در حضور کاتالیست ناهمگن KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) است (جدول ۱،

نیکل به دلیل ویژگی‌های شیمیایی مشابه فلزات پالادیوم و پلاتین، به عنوان یکی از موثرترین فلزات واسطه شناخته شده است. همچنین، نیکل دارای چندین برتری از جمله قیمت مناسب، در دسترس بودن و سازگاری با محیط‌زیست است که آن را به گزینه‌ای مناسب‌تر نسبت به سایر فلزات تبدیل می‌کند [۱۱]. کاتالیست‌های حاوی نیکل در طیف گسترده‌ای از واکنش‌ها از جمله اکسایش انتخابی الکل‌ها [۱۲-۱۵]، اپوکسایش آلکن‌ها [۱۸-۱۶]، تبدیل سولفیدها به سولفوکسیدها و جفت‌شدن اکسایشی تیول‌ها به دی‌سولفیدها [۲۱-۱۹] استفاده می‌شوند. همچنین، جفت‌شدن اکسایشی و انتخابی تیول‌های آلیفاتیک در حضور نانوذرات نیکل به عنوان کاتالیست، گزارش شده است [۲۲ و ۲۳].

در سال ۲۰۰۳ میلادی، یک سیلیکای مزومخلخل سه بعدی جدید با تقارن *la3d* به نام KIT-6 سنتز و معرفی شد [۲۴]. KIT-6 دارای ویژگی‌های قابل توجهی مانند سطح ویژه بالا، حجم منافذ قابل‌توجه، و پایداری شیمیایی و حرارتی بالا می‌باشد [۲۵]. علاوه بر این، ساختارهای مزوحفره سه بعدی، پراکندگی عالی کاتالیست و انتشار سریع‌تر واکنش‌دهنده‌ها و محصولات را فراهم می‌کنند [۲۶].

به‌تازگی ما تهیه، شناسایی و کاربرد یک کمپلکس باز شیف نامتقارن نیکل (II) تثبیت‌شده درون سیلیکای مزومخلخل سه بعدی KIT-6 به عنوان یک کاتالیست ناهمگن موثر در اکسایش انتخابی سولفیدها به سولفوکسیدها را گزارش کرده‌ایم [۲۷]. در این پژوهش، کاربرد کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) در اپوکسایش آلکن‌ها و اکسایش آلکن‌ها با استفاده از اکسیژن‌دهنده هیدروژن پراکسید ۳۰ درصد بررسی شد (طرح‌واره ۱). علاوه بر این، قابلیت بازیابی و استفاده دوباره از این کاتالیست نیز بررسی شد.



طرح‌واره ۱. اکسایش هیدروکربن‌ها با هیدروژن پراکسید در حضور کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac).

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و دستگاه‌ها

کلیه مواد مورد استفاده در این پژوهش، از شرکت‌های مرک و فلوکا تهیه شدند. کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) بر اساس روش گزارش‌شده قبلی تهیه و شناسایی شد [۲۷]. طیف‌های زیر قرمز تبدیل

۸۵ درصد و گزینش پذیری ۱۰۰ درصد تولید شد. اپوکسایش استایرن و α -متیل استایرن، به ترتیب استایرن اکسید (۸۰ درصد) و α -متیل استایرن اکسید (۷۳ درصد) به عنوان محصول‌های اصلی و ۷ درصد بنزالدهید و ۱۰ درصد استوفنون به عنوان محصول‌های فرعی تولید کرد. علاوه بر این، ایندن با بازده ۸۰ درصد و گزینش پذیری ۱۰۰ درصد به اپوکسید مربوطه تبدیل شد. همچنین آلکن‌های خطی ۱-اکتن و ۱-دودسن با بازده خوب و گزینش پذیری ۱۰۰ درصد به اپوکسیدهای مربوطه تبدیل شدند.

در این پژوهش، همچنین اکسایش آلکن‌های مختلف تحت شرایط بهینه انجام شد. طبق نتایج ارائه شده در جدول ۳، در این سامانه کاتالیستی و در شرایط بهینه، آلکن‌های مختلف به کتون‌ها و الکل‌های مربوطه تبدیل شدند. سیکلواکتان و سیکلوهگزان به کتون و الکل مربوطه با بازده خوب اکسید شدند. اتیل بنزن و پروپیل بنزن به کتون‌های مربوطه با بازده خوب و گزینش پذیری عالی (۱۰۰ درصد) تبدیل شدند. همچنین، در مورد تترالین، فقط موقعیت α ، اکسید و ۱-تترالون با بازده متوسط با گزینش پذیری ۱۰۰ درصد تولید شد.

همچنین این روش با دیگر روش‌های گزارش شده در زمینه اپوکسایش سیکلواکتان، مقایسه گردید (جدول ۴). نتایج نشان داد که روش ارائه شده دارای برتری‌هایی چون بازده بالای محصول اپوکسید، استفاده از هیدروژن پراکسید به عنوان اکسیژن‌دهنده ارزان، در دسترس و سازگار با محیط زیست و انجام واکنش در شرایط ملایم می‌باشد.

ردیف ۱۵). این تفاوت می‌تواند به این دلیل باشد که تثبیت کمپلکس بر روی بستر و تشکیل کاتالیست ناهمگن، باعث جدا سازی مکان‌های فعال کاتالیستی شده و از تشکیل گونه های دیمری اکسو و پروکسو که باعث غیرفعال شدن کاتالیست همگن می‌شوند، جلوگیری می‌کند [۲۸]. از بین حلال‌های متانول، اتانول، استونیتریل، استن، کلروفرم و دی‌کلرومتان، استونیتریل به عنوان بهترین حلال انتخاب شد، زیرا در این حلال، بیشترین بازده اپوکسایش سیکلواکتان به دست آمد (جدول ۱، ردیف‌های ۱۰-۵). به نظر می‌رسد قطبیت بالای استونیتریل باعث حلالیت بهتر واکنش دهنده ها می‌شود. در این مطالعه همچنین اثر اکسیژن دهنده‌های مختلف دیگر مانند سدیم پریدات، ترشیو-بوتیل هیدروپراکسید و اوره-هیدروژن پراکسید در اپوکسایش سیکلواکتان بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده (جدول ۱، ردیف های ۵ و ۱۴-۱۱)، در این سامانه کاتالیستی، هیدروژن پراکسید به علت تولید محصول اپوکسید با بیشترین بازده، به عنوان بهترین اکسیژن‌دهنده انتخاب شد.

پس از بهینه‌کردن شرایط واکنش، اپوکسایش آلکن‌های مختلف در شرایط بهینه (حلال: استونیتریل، مقدار کاتالیست: ۰/۰۱۶ میلی‌مول و اکسیژن‌دهنده: هیدروژن پراکسید ۳۰ درصد) بررسی و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، سیکلواکتان پس از ۴ ساعت با بازده ۹۰ درصد با گزینش پذیری ۱۰۰ درصد به اپوکسید مربوطه تبدیل شد. همچنین در اپوکسایش سیکلوهگزن، محصول سیکلوهگزن اکسید با بازده

جدول ۱. بهینه‌سازی شرایط واکنش اپوکسایش سیکلواکتان در حضور کاتالیست (KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) الف


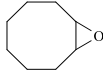

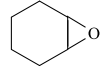
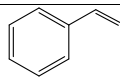
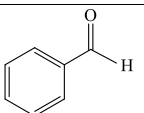
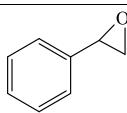
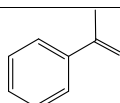
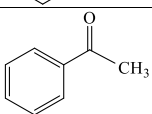
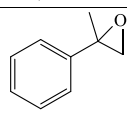
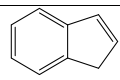
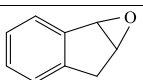
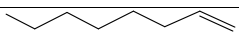
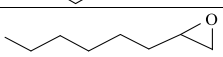
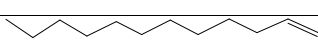
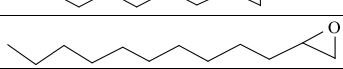
ردیف	مقدار کاتالیست (میلی‌مول)	حلال	اکسیژن دهنده	درصد محصول اپوکسید
۱	۰	استونیتریل	هیدروژن پراکسید	۸
۲	۰/۰۰۴	استونیتریل	هیدروژن پراکسید	۲۷
۳	۰/۰۰۸	استونیتریل	هیدروژن پراکسید	۵۲
۴	۰/۰۱۲	استونیتریل	هیدروژن پراکسید	۷۳
۵	۰/۰۱۶	استونیتریل	هیدروژن پراکسید	۹۰
۶	۰/۰۱۶	متانول	هیدروژن پراکسید	۵۵
۷	۰/۰۱۶	اتانول	هیدروژن پراکسید	۶۰
۸	۰/۰۱۶	استن	هیدروژن پراکسید	۶۷
۹	۰/۰۱۶	کلروفرم	هیدروژن پراکسید	۳۵
۱۰	۰/۰۱۶	دی کلرومتان	هیدروژن پراکسید	۲۰
۱۱	۰/۰۱۶	استونیتریل	سدیم پریدات	۴۳
۱۲	۰/۰۱۶	استونیتریل	ترشیو-بوتیل هیدروپراکسید	۳۲
۱۳	۰/۰۱۶	استونیتریل	اوره-هیدروژن پراکسید	۲۸
۱۴	۰/۰۱۶	استونیتریل	بدون اکسیژن دهنده	۰
۱۵	Ni(salenac) ⁺	استونیتریل	هیدروژن پراکسید	۲۳
۱۶	KIT-6 ^c	استونیتریل	هیدروژن پراکسید	۸
۱۷	KIT-6-pr-NH ₂ ^c	استونیتریل	هیدروژن پراکسید	۱۰

الف) سیکلواکتان (۱ میلی‌مول)، کاتالیست، حلال (۴ میلی‌لیتر)، اکسیژن‌دهنده (۲ میلی‌مول)، زمان واکنش (۴ ساعت)، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

ب) ۰/۰۱۶ میلی‌مول (۴/۸۵ میلی‌گرم) کمپلکس Ni(salenac) به عنوان کاتالیست استفاده شد.

ج) به ترتیب مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم از سیلیکای مزومتخلخل KIT-6-NH₂ و KIT-6 به عنوان کاتالیست استفاده شد.

جدول ۲. اپوکسایش آلکن‌ها با هیدروژن پراکسید در حضور کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) الف


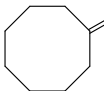
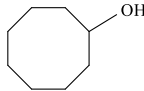

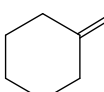
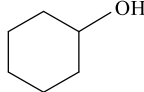
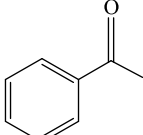
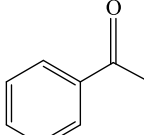
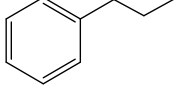
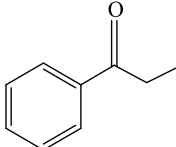
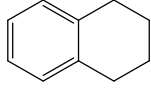
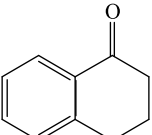
ردیف	آلکن	محصول (محصولات)	درصد تبدیل	درصد اپوکسید	زمان (ساعت)
۱			۹۰	۹۰	۴
۲			۸۵	۸۵	۴
۳		 	۳۸۷	۸۰	۴
۴		 	۴۸۳	۷۳	۴
۵			۸۰	۸۰	۴
۶			۷۵	۷۵	۵
۷			۶۳	۶۳	۵

الف) آلکن (۱ میلی مول)، کاتالیست (۰/۰۱۶ میلی مول)، استونیتریل (۴ میلی لیتر)، هیدروژن پراکسید ۳۰٪ (۲ میلی مول)، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

ب) محصول جانبی بنزالدهید به مقدار ۷ درصد تولید شد.

ج) محصول جانبی استوفنون به مقدار ۱۰ درصد تولید شد.

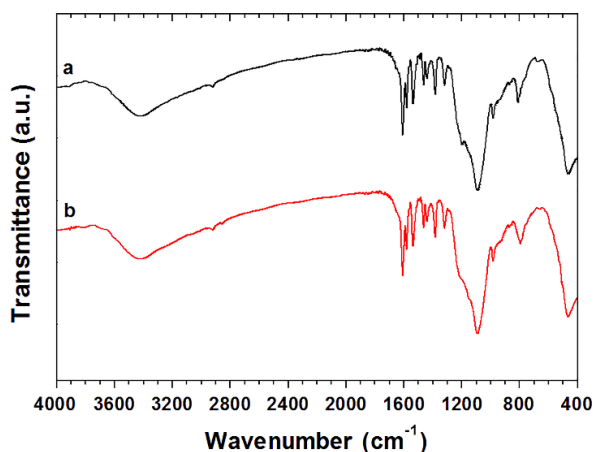
جدول ۳. اکسایش آلکان‌ها با هیدروژن پراکسید در حضور کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) الف

ردیف	آلکان	محصول (محصولات)	درصد تبدیل	درصد کتون	درصد الکل	زمان (ساعت)
۱		 	۷۵	۶۲	۱۳	۵
۲		 	۷۳	۶۵	۸	۵
۳			۶۷	۶۷	-	۵
۴			۶۲	۶۲	-	۵
۵			۵۵	۵۵	-	۵

الف) آلکان (۱ میلی مول)، کاتالیست (۰/۰۱۶ میلی مول)، استونیتریل (۴ میلی لیتر)، هیدروژن پراکسید ۳۰ درصد (۲ میلی مول)، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۴. مقایسه کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) با کاتالیست‌های گزارش شده در واکنش اپوکسایش سیکلواکتن

مرجع	مقدار عدد گردشی (TON)	زمان واکنش (ساعت)	درصد اپوکسید	شرایط انجام واکنش	کاتالیست	ردیف
[۲۹]	۴۵	۳	۹۰	دی‌کلرومتان/ ترشیو-بوتیل هیدروپراکسید/ دمای اتاق	Ni(II) salen complex supported on CPGO	۱
[۳۰]	۴۳/۵	۳	۶۹	استونیتریل/هیدروژن پراکسید/ ۸۵ °C	Ni ₂ ID	۲
[۳۱]	۵۵/۳۶	۴	۹۳	استونیتریل/ترشیو-بوتیل هیدروپراکسید/ ۸۰ °C	Ru _{np} -nSTDP	۳
[۳۲]	۱۹	۴	۹۵	کلروفرم/ترشیو-بوتیل هیدروپراکسید/ ۷۰ °C	DVB-AA-Mo	۴
[۳۳]	۴۳/۷۵	۴/۵	۹۸	۲،۱-دی‌کلرواتان/ترشیو-بوتیل هیدروپراکسید/ فلاکس	Fe@B-Im-V	۵
پژوهش حاضر	۵۶/۲۵	۴	۹۰	استونیتریل/هیدروژن پراکسید/ دمای اتاق	KIT-6-pr-NH ₂ -Ni(salenac)	۶



شکل ۱. طیف زیرقرمز کاتالیست بازیابی شده (a) و کاتالیست تازه (b).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اپوکسایش آلکن‌ها و اکسایش آلکن-های مختلف در حضور هیدروژن پراکسید ۳۰ درصد در حضور کاتالیست ناهمگن KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) مطالعه گردید. ابتدا، تاثیر عوامل مختلف مانند نوع حلال، مقدار کاتالیست و نوع اکسیژن‌دهنده بررسی و با توجه به نتایج به دست آمده، استونیتریل و هیدروژن پراکسید به ترتیب به عنوان بهترین حلال و بهترین اکسیژن‌دهنده انتخاب شدند. همچنین، مقدار بهینه کاتالیست برای انجام واکنش، ۱۰۰ میلی‌گرم (۰/۰۱۶ میلی‌مول) تعیین شد. نتایج نشان داد که در این سامانه کاتالیستی، انواع آلکن‌ها و آلکن‌ها با انتخاب‌پذیری بالا و بازده خوب تا عالی در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) اکسید می‌شوند. همچنین، این کاتالیست ناهمگن قابلیت بازیابی و استفاده مجدد برای ۵ مرتبه متوالی با حفظ کارایی را داشت.

سپاسگزاری

نویسندگان از همکاری معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان سپاسگزاری می‌نمایند.

در پایان، بازیابی و استفاده دوباره از کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) در واکنش اپوکسایش سیکلواکتن با هیدروژن پراکسید ۳۰ درصد بررسی شد. بدین منظور، پس از پایان واکنش، کاتالیست صاف و به دقت با دی‌کلرومتان شسته شد. سپس در آون در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت خشک گردید و دوباره در واکنش همانند، مورد استفاده قرار گرفت. همان‌گونه که نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد از فعالیت کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) در واکنش اپوکسایش سیکلواکتن بعد از ۵ مرحله متوالی به طور محسوس کاسته نشده است. همچنین مقدار نیکل وارد محلول شده بسیار اندک است که این موضوع نشان می‌دهد کاتالیست در محیط واکنش پایداری بسیار خوبی دارد.

جدول ۵. بررسی بازیابی کاتالیست KIT-6-pr-NH₂-Ni(salenac) در اپوکسایش سیکلواکتن با هیدروژن پراکسید

مرتبه بازیابی	بازده اپوکسید بعد از ۴ ساعت (%)	مقدار نیکل وارد محلول شده (%)
۱	۹۰	۲/۷
۲	۹۰	۱/۵
۳	۸۵	۱/۲
۴	۸۳	۰
۵	۸۰	۰

الف) مقدار نیکل توسط جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

همچنین، ماهیت کاتالیست بازیابی شده با طیف‌سنجی زیرقرمز بررسی شد. طیف زیرقرمز کاتالیست پس از پنج بار استفاده در شکل ۱a نمایش داده شده است. سه نوار در ۱۰۸۵، ۸۰۸ و ۴۶۷ cm⁻¹ به ترتیب به ارتعاش‌های کششی نامتقارن Si-O-Si، کششی متقارن و خمشی اختصاص داده شدند. علاوه بر این، نوار مشاهده شده در ۲۹۲۰ cm⁻¹ به ارتعاش‌های گروه‌های CH₂ آلیفاتیک نسبت داده شد. همچنین دو نوار در ۱۶۲۷ و ۱۶۰۳ cm⁻¹ به دو ارتعاش کششی مربوط به دو گروه C=N متفاوت در لیگاند باز شیف سالن نامتقارن تخصیص داده شد. تمام این نوارها در طیف زیرقرمز کاتالیست تازه (شکل ۱b) نیز مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد ساختار کاتالیست پس از بازیابی حفظ شده است.

- [16] T. Maharana, N. Nath, H. C. Pradhan, S. Mantri, A. Routaray, A. K. Sutar, *Reac. Func. Polym.* **171**, 105142 (2022).
- [17] M. Bazarganipour, M. Salavati-Niasari, *Chem. Eng. J.* **286**, 259 (2016).
- [18] A. Allahresani, *J. Iran. Chem. Soc.* **14**, 1051 (2017).
- [19] A. Ghorbani-Choghamarani, B. Tahmasbi, F. Arghand, S. Faryadi, *RSC Adv.* **5**, 92174 (2015).
- [20] M. Nikoorazm, A. Ghorbani-Choghamarani, H. Mahdavi, S. M. Esmaili, *Microporous Mesoporous Mater.* **211**, 174 (2015).
- [21] T. Tamoradi, M. Ghadermazi, A. Ghorbani-Choghamarani, *Appl. Organometal. Chem.* **32**, e3974 (2018).
- [22] J. Montgomery, *Angew Chem. Int. Ed.* **43**, 3890 (2004).
- [23] A. Saxena, A. Kumar, S. Mozumdar, *J. Mol. Catal. A: Chem.* **269**, 35 (2007).
- [24] F. Kleitz, S. H. Choi, R. Ryoo, *Chem. Commun.* **17**, 2136 (2003).
- [25] F. Zhang, Y. Zheng, Y. Cao, C. Chen, Y. Zhan, X. Lin, Q. Zheng, K. Wei, J. Zhu, *J. Mater. Chem.* **19**, 2771 (2009).
- [26] R. J. Kalbasi, N. Mosadegh, *J. Inorg. Organomet. Polym.* **22**, 404 (2012).
- [27] M. Hatefi Ardakani, M. Aliavazi, *J. Porous Mater.* **31**, 473 (2024).
- [28] S. Bhunia, S. Koner, *Polyhedron* **30**, 1857 (2011).
- [29] A. Allahresani, *J. Iran. Chem. Soc.* **14**, 1051 (2017).
- [30] M. S. S. Adam, *Appl. Organometal. Chem.* **32**, e4234 (2018).
- [31] S. Haghshenas Kashani, M. Moghadam, S. Tangestaninejad, V. Mirkhani, I. Mohammadpoor-Baltork, *Catal. Lett.* **148**, 1110 (2018).
- [32] W. Fan, D. Shi, B. Feng, *Catal. Commun.* **74**, 1 (2016).
- [33] M. Mirzaee, B. Bahramian, P. Gholampour, S. Teymouri, T. Khorsand, *Appl. Organometal. Chem.* **33**, e4792 (2019).

*عده دار مکاتبات

نشانی: ایران، استان کرمان، شهرستان رفسنجان، دانشگاه ولی عصر (عج)، دانشکده علوم پایه، گروه شیمی، تلفن: ۰۳۴۳۱۳۱۲۴۳۳.

مراجع

- [1] I. W. C. E. Arends, R. A. Sheldon, in: J. -E. Bäckvall (Ed.) *Modern Oxidation Methods*, Wiley-VCH, Weinheim, **2004**.
- [2] K. Kamiya, A. Kuwabara, T. Harada, S. Nakanishi, *ChemPhysChem* **20**, 648 (2019).
- [3] Q. Zhang, J. D. Gordon, C. R. Goldsmith, *Inorg. Chem.* **52**, 13546 (2013).
- [4] W. Wu, H. Jiang, *Acc. Chem. Res.* **45**, 1736 (2012).
- [5] A. Bezaatpour, *React. Kinet. Mech. Cat.* **112**, 453 (2014).
- [6] M. Behzad, S. Etminani, *Appl. Chem. Today* **7**, 31 (2012).
- [7] H. Kargar, A. Adabi Ardakani, N. Feizi, *Appl. Chem. Today* **14**, 9 (2019).
- [8] H. R. Mardani, M. Ziari, *Res. Chem. Intermed.* **44**, 6605 (2018).
- [9] M. Moosavifar, S. Tangestaninejad, M. Moghadam, V. Mirkhani, I. Mohammadpoor-Baltork, *J. Mol. Catal. A: Chem.* **377**, 92 (2013).
- [10] M. Bagherzadeh, M. Hosseini, A. Mortazavi-Manesh, *Inorg. Chem. Commun.* **107**, 107495 (2019).
- [11] H. Fu-She, *Chem. Soc. Rev.* **42**, 5270 (2013).
- [12] R. Rajarao, T. H. Kim, B. R. Bhat, *J. Coord. Chem.* **65**, 2671 (2012).
- [13] V. Thamilarasan, P. Revathi, A. Praveena, J. Kim, V. Chandramohan, N. Sengottuvelan, *Inorg. Chim. Acta.* **508**, 119626 (2020).
- [14] P. B. Bhat, B. R. Bhat, *New. J. Chem.* **39**, 4933 (2015).
- [15] P. B. Bhat, F. Inam, B. R. Bhat, *ACS Comb. Sci.* **16**, 397 (2014).