

مطالعه اثر پارامترهای عملیاتی در فرآیند هیدروایزومریزاسیون نرمال پنتان در حضور نانوکاتالیست Pt/ZSM-5

نازنین چرچی، اکرم توکلی^{*}، علی اکبر بابالو، محبوبه اجتماعی، بهروز بیاتی و یاسر بیات
مرکز تحقیقات مواد نانو ساختار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱

چکیده

در پژوهش حاضر، فرآیند هیدروایزومریزاسیون نرمال پنتان بر روی نانوکاتالیست سنتزی Pt/ZSM-5 انجام شد و اثر پارامترهای عملیاتی از قبیل دما، فشار و نسبت هیدروژن به هیدروکربن مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که به دلیل گرمازا بودن این فرآیند، افزایش دما تاثیر نامطلوبی بر انتخاب پذیری ایزوپنتان دارد. همچنین مطابق انتظار، با افزایش فشار، بازده فرآیند ایزومریزاسیون افزایش می یابد که می توان علت این پدیده را کاهش واکنش های هیدروکراکینگ به دلیل افزایش فشار دانست. یکی دیگر از پارامترهای موثر در ایزومریزاسیون آلکان های خطی، نسبت هیدروژن به هیدروکربن است که در این تحقیق اثر آن در دو بخش نسبت های بالا و پایین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در نسبت های پایین هیدروژن به هیدروکربن، با افزایش این نسبت، به دلیل اشغال سایت های فعال توسط هیدروژن، درصد تبدیل کاهش می یابد. در حالی که با هیدروژناسیون آلکان های سطحی و در نتیجه کاهش واکنش های کراکینگ، انتخاب پذیری نسبت به ایزوپنتان افزایش می یابد. در مقادیر بالای هیدروژن به هیدروکربن، تغییرات این نسبت تاثیری بر انتخاب پذیری نسبت به ایزوپنتان ندارد و تنها منجر به کاهش اندک در درصد تبدیل نرمال پنتان می شود.

کلمات کلیدی: هیدروایزومریزاسیون، شرایط عملیاتی، ژئولیت، نرمال پنتان، نانوکاتالیست Pt/ZSM-5

مقدمه

شاخه دار با عدد اکتان بالاتر، تبدیل کرد [۳]. علاوه بر این بنزین به دست آمده از فرآیند ایزومریزاسیون عاری از افزودنی هایی از قبیل بنزن، آروماتیک ها و اولفین است که استفاده از آن ها در سوخت های پاک جدید به دلیل عوارض زیست محیطی محدود شده است [۴ و ۵]. کاتالیست های متعددی برای انجام این فرآیند به کار می رود که از میان آن ها کاتالیست های دو عاملی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [۴ و ۶].

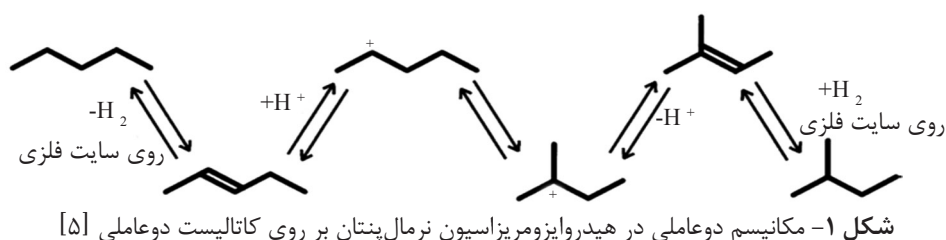
برش نفتای سبک که برای تولید بنزین استفاده می شود، شامل مقادیر قابل توجهی از هیدروکربن های با عدد اکتان پایین از قبیل نرمال پنتان و نرمال هگزان است [۱ و ۲]. هیدروکربن های خطی را می توان با استفاده از فرآیند ایزومریزاسیون به هیدروکربن های

*مسئول مکاتبات

که در شکل ۱ نشان داده شده است. طبق این مکانیسم، نرمال پنتان با از دست دادن هیدروژن روی فلز واسطه، به پنتن تبدیل می‌شود. پنتن تولید شده پس از انجام ایزومریزاسیون روی سایت اسیدی، به ایزوپنتن تبدیل می‌شود. در نهایت، ایزوپنتان از هیدروژنه کردن مجدد ایزوپنتن روی فلز واسطه به وجود می‌آید [۴، ۵ و ۷].

در ایزومریزاسیون آلکان‌ها، واکنش‌های جانبی، انتخاب‌پذیری نسبت به محصولات اصلی را کاهش می‌دهند. شرایط انجام واکنش و در واقع پارامترهای عملیاتی از قبیل دما، فشار، سرعت فضایی حجمی و نسبت مولکولی هیدروژن به هیدروکربن تاثیر بسزایی در پیشرفت واکنش از مسیرهای گوناگون و در نتیجه انتخاب‌پذیری و درصد تبدیل واکنش دارند. همچنین پارامترهای عملیاتی مختلف در ایزومریزاسیون آلکان‌ها بسته به نوع کاتالیست و تعداد اتم‌های کربن آلکان تاثیر متفاوتی در فرآیند دارند. در کارهای تحقیقاتی منتشر شده، ایزومریزاسیون نرمال پنتان به دلیل داشتن دمای جوش نزدیک به دمای محیط و در نتیجه دشواری استفاده از آن به عنوان خوراک و تزریق به سیستم، کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین مطالعات نشان می‌دهد حداکثر فعالیت کاتالیست پلاتین بر پایه زئولیت ZSM-5 در ایزومریزاسیون نرمال پنتان، در محدوده نسبت Si / Al برابر ۱۰ تا ۵۰ است در حالی که به دلیل دشواری سنتز زئولیت ZSM-5 با این نسبت Si / Al، اغلب موارد گزارش شده در ایزومریزاسیون نرمال پنتان در حضور کاتالیست‌های تجاری بوده است.

این نوع کاتالیست‌ها شامل یک عامل فلزی (فلز واسطه) برای هیدروژناسیون / دی‌هیدروژناسیون و یک عامل اسیدی است [۷]. در سال‌های اخیر تلاش زیادی برای استفاده از زئولیت ZSM-5 به عنوان پایه کاتالیست در فرآیند ایزومریزاسیون پارافین‌ها صورت گرفته است. این زئولیت از نظر داشتن سایت‌های اسیدی فعال و قدرت اسیدی مناسب در میان زئولیت‌های دیگر، همواره به عنوان یکی از پرکاربردترین زئولیت‌های صنعتی مطرح بوده است و اندازه حفرات آن به گونه‌ای است که از تشکیل مواد پلی‌آروماتیک (کک) در کانال‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین ساختار سه بعدی این زئولیت، دسترسی به سایت‌های اسیدی را تسهیل می‌نماید [۸]. واکنش ایزومریزاسیون معمولاً در حضور گازهای هیدروژن یا نیتروژن (گازهای رقیق کننده) انجام می‌شود. اتمسفر هیدروژن از نظر حفظ فعالیت کاتالیست لازم است و به منظور جلوگیری از نشست کک روی سایت‌های اسیدی به کار می‌رود [۳]. هیدروکربن‌های با تعداد کربن بالاتر روی سطح، در دمای واکنش به راحتی جذب نشده و به صورت کک روی سطح جمع می‌شوند. بررسی‌ها نشان داده است که هیدروژن، بهترین بازدارنده واکنش‌های جانبی است. غیرفعال شدن زئولیت‌ها با تشکیل کک از طریق مسموم شدن سایت‌های اسیدی یا مسدود شدن حفرات انجام می‌گیرد. ذرات کک با نشست روی سایت‌های فعال، مانع دسترسی واکنش‌دهنده‌ها به این سایت‌ها شده و باعث کاهش فعالیت و انتخاب‌پذیری کاتالیست می‌شود [۹]. واکنش ایزومریزاسیون در حضور کاتالیست‌های دو عاملی با مکانیسم دو عاملی [۱۰] پیش می‌رود

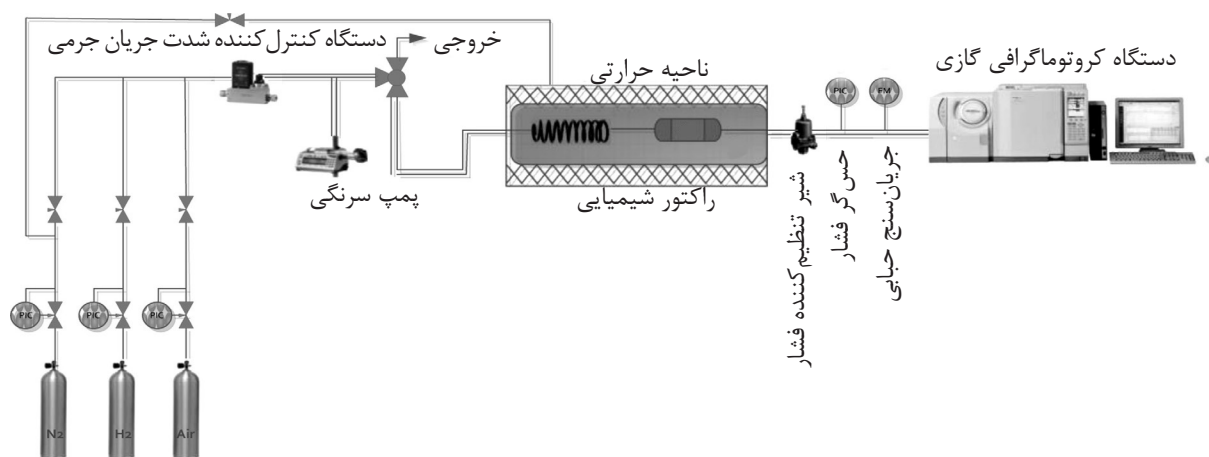


شده پس از تبادل یونی در محلول کلرید آمونیوم به مدت ۲۴ ساعت در دمای 110°C خشک و سپس در دمای 540°C به مدت ۴ ساعت کلسینه شد تا به فرم اسیدی H-ZSM-5 تبدیل شود. برای نشان دادن پلاتین روی پایه به میزان تقریباً ۱٪ وزنی، پودر H-ZSM-5 تهیه شده با محلول شامل $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ با مقادیر محاسبه شده، به مدت ۱۶ ساعت در دمای محیط هم‌زده شد. نمونه به دست آمده پس از فیلتراسیون در 100°C به مدت ۱۰ ساعت خشک شده و سپس تحت جریان هوا به مدت دو ساعت در دمای 450°C کلسینه شد. کاتالیست تهیه شده ابتدا به صورت پودر بود که پس از تحت فشار قرار گرفتن در دستگاه قرص‌ساز به صورت قرص درآمد و سپس با خرد کردن قرص‌ها با مش بین ۲۰-۴۰ الک شد. در هر آزمون کاتالیستی، ۰/۵ gr کاتالیست در راکتور قرار گرفت و به مدت ۲ ساعت در دمای 400°C تحت هوا پیش‌فرآوری شد تا ناخالصی‌ها، رطوبت و مواد جذب شده در سطح آن دفع گردد. عملیات فعال‌سازی کاتالیست نیز در دمای 450°C و به مدت ۲ ساعت در حضور هیدروژن انجام شد. نمودار جریان‌ی سامانه مورد استفاده در شکل ۲ آورده شده است. راکتور، استوانه‌ای به قطر داخلی ۴/۵ mm و از جنس استیل ضد زنگ است که در کوره الکتریکی قرار می‌گیرد.

در کار تحقیقاتی قبل که توسط این گروه انجام گرفت، زئولیت نانوساختار Na-ZSM-5 با مورفولوژی بسیار مطلوب و با نسبت Si/Al برابر ۲۵ با استفاده از عامل چیلیت سنتز شد [۱۱]. لازم به ذکر است که سنتز زئولیت نانوساختار Na-ZSM-5 در حضور عامل چیلیت، روش جدیدی است که زئولیت سنتز شده با این روش تاکنون برای سنتز کاتالیست مورد استفاده قرار نگرفته است. به همین دلیل در پژوهش حاضر برای اولین بار زئولیت نانوساختار Na-ZSM-5 سنتز شده در حضور عامل چیلیت در سنتز کاتالیست Pt/ZSM-5 برای فرآیند هیدروایزومریزاسیون نرمال پنتان به کار گرفته شد و پارامترهای عملیاتی موثر در این فرآیند و تاثیر آن‌ها در بازده فرآیند، درصد تبدیل نرمال پنتان و انتخاب‌پذیری نسبت به ایزوپنتان ارزیابی شده است.

روش کار

در این تحقیق فرآیند ایزومریزاسیون نرمال پنتان در حضور کاتالیست پلاتین بر پایه زئولیت نانوساختار ZSM-5 در راکتور بستر ثابت مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه نانوکاتالیست پلاتین بر پایه ZSM-5، ابتدا پودر زئولیتی Na-ZSM-5 به روش هیدروترمال و با زمان بلورینگی ۷۲ ساعت، با توجه به روش ارائه شده در کار تحقیقاتی قبلی نویسندگان سنتز شد [۱۱]. در ادامه، پودر Na-ZSM-5 کلسینه



شکل ۲- نمودار جریان‌ی سامانه راکتور بستر ثابت برای فرآیند ایزومریزاسیون نرمال پنتان

شامل هیدروکربن‌های ۶ کربنی: (معادلات ۱ تا ۳ در

$$X = \frac{\sum A_i - A_{n-pentane}}{\sum A_i} \times 100 \quad (1)$$

$$S_p = \frac{A_p}{\sum A_i - A_{n-pentane}} \times 100 \quad (2)$$

$$Y = \frac{A_{iso-pentane}}{\sum A_i} \times 100 \quad (3)$$

بحث و نتایج

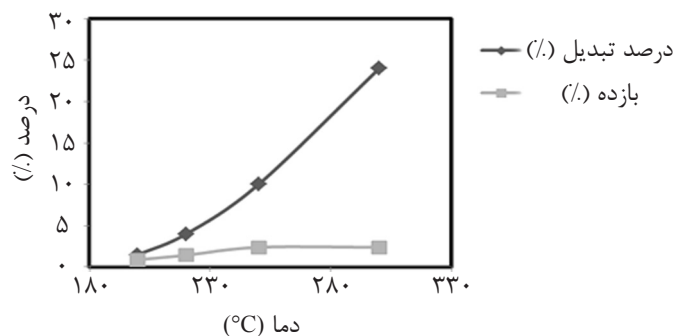
اثر دما

شکل ۳ تغییرات درصد تبدیل و بازده را با دما در فرآیند ایزومریزاسیون نرمال پنتان در حضور کاتالیست Pt/ZSM-5 نشان می‌دهد. تغییرات انتخاب‌پذیری واکنش نسبت به محصولات مختلف نیز در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دما، درصد تبدیل نرمال پنتان افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که انتخاب‌پذیری نسبت به ایزوپنتان کاهش می‌یابد، در حالی که انتخاب‌پذیری نسبت به محصولات کراکینگ (هیدروکربن‌های با تعداد اتم کمتر از ۵)، افزایش می‌یابد. تغییرات ترکیب مخلوط تعادلی برحسب دما (شکل ۵) برای ایزومرهای پنتان، نشان می‌دهد که به دلیل گرمازا بودن فرآیند ایزومریزاسیون، برای به دست آوردن ایزومرهای شاخه‌دار، باید عملیات ایزومری را در دماهای پایین انجام داد [۱].

در این سیستم، خوراک به صورت مخلوط هیدروژن و هیدروکربن وارد سیستم می‌شود که هیدروکربن توسط پمپ سرنگی در مسیر تزریق شده و تنظیم دبی هیدروژن با استفاده از کنترل کننده شدت جریان (MFC)^۱ انجام می‌گیرد. هم‌چنین تمامی مسیرها با عایق حرارتی پوشانده شده و توسط المنت گرم می‌شود تا از چگالش هیدروکربن در مسیر جلوگیری شود. برای تنظیم فشار داخل راکتور، از کنترل کننده فشار^۲ استفاده می‌شود. غلظت محصولات خروجی از طریق دستگاه کروماتوگرافی گازی (طیف گستر، مدل GC-2550 TG) با استفاده از شناساگر FID و ستون مویینه DB-1 به طول ۳۰ m، به صورت هم زمان اندازه‌گیری می‌شود.

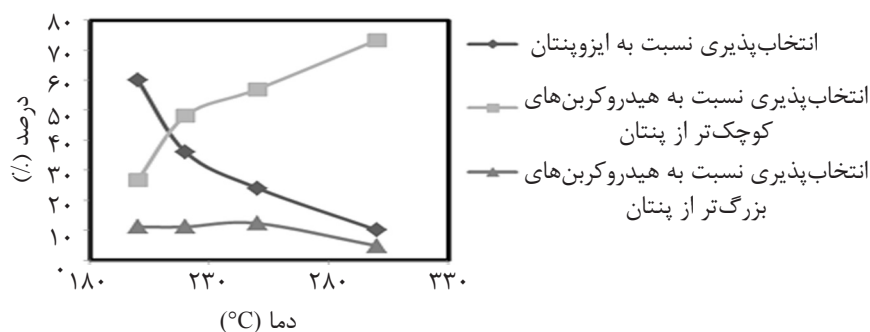
درصد تبدیل نرمال پنتان (X)، انتخاب‌پذیری واکنش نسبت به محصولات مختلف (S_p) برحسب درصد مولی و بازده فرآیند ایزومریزاسیون (Y)، به ترتیب با استفاده از روابط ۱ تا ۳ محاسبه می‌گردند که در این روابط، A_i سطح کروماتوگرافی اصلاح شده برای هر جزء است. محصولات واکنش ایزومریزاسیون نرمال پنتان در پژوهش حاضر، به صورت زیر دسته‌بندی شده‌اند:

- هیدروکربن‌های با تعداد اتم کربن کمتر از ۵ شامل هیدروکربن‌های ۳ و ۴ کربنی
- ایزوپنتان
- هیدروکربن‌های با تعداد اتم کربن بیشتر از ۵

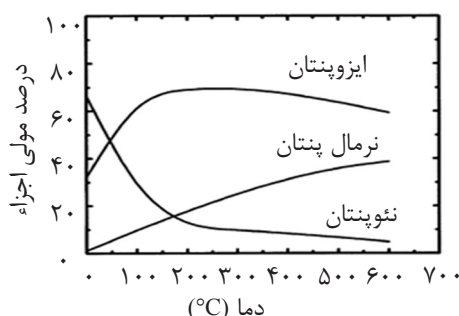


شکل ۳- تغییرات درصد تبدیل و بازده ایزومریزاسیون نرمال پنتان با دمای واکنش در فشار اتمسفریک [$(H_2/nC_5=9$ و $WHSV=0/2(h^{-1})$)]

1. Mass Flow Controller
2. Back Pressure Regulator



شکل ۴- تغییرات انتخاب پذیری محصولات مختلف واکنش با دمای واکنش در فشار اتمسفریک [$H_2/nC_5=9$ و $WHSV=0.2(h^{-1})$]



شکل ۵- تاثیر دما بر روی درصد مولی محصولات واکنش ایزومریزاسیون [۱]

می شود. در نتیجه میزان تبدیل افزایش می یابد. در واکنش های هیدروکراکینگ، محصولات با تعداد مول های بیشتری تولید می شود. به همین دلیل با افزایش فشار، واکنش های هیدروکراکینگ کاهش می یابد. کاهش واکنش های هیدروکراکینگ نیز باعث افزایش انتخاب پذیری نسبت به ایزوپنتان می گردد. لازم به ذکر است که فرآیند ایزومریزاسیون صنعتی در فشار بالا صورت می گیرد [۹]. در بعضی مراجع، محدوده این فشار را بین ۱۷ تا ۲۷ atm اعلام کرده اند. در فشارهای پایین تر از ۵ atm، واکنش های جانبی کراکینگ افزایش می یابد و کاتالیست نیز زودتر فرسوده می شود [۱۲].

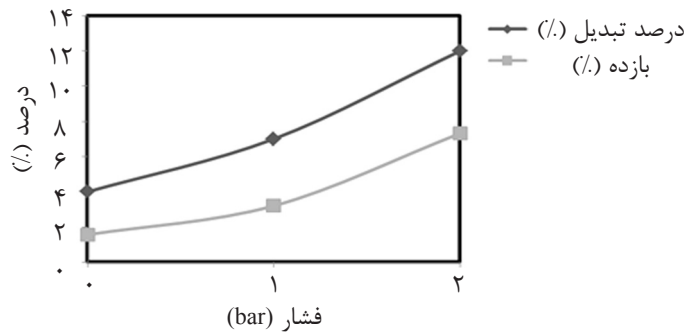
اثر نسبت هیدروژن به هیدروکربن

نسبت هیدروژن به هیدروکربن به صورت مجزا در دو محدوده نسبت های پایین و بالا مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۸ تغییرات درصد تبدیل نرمال پنتان و بازده فرآیند ایزومریزاسیون را با نسبت های پایین هیدروژن به هیدروکربن نشان می دهد.

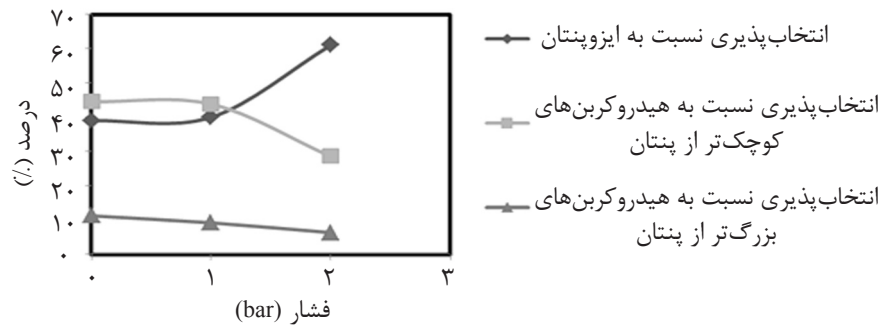
نتایج پژوهش حاضر نیز نشان می دهد که با افزایش دما، سرعت واکنش های کراکینگ و به تبع آن درصد تبدیل نرمال پنتان افزایش می یابد. همچنین افزایش سرعت واکنش های هیدروکراکینگ باعث کاهش محصولات ایزومری شده و انتخاب پذیری نسبت به ایزوپنتان را کاهش می دهد.

اثر فشار

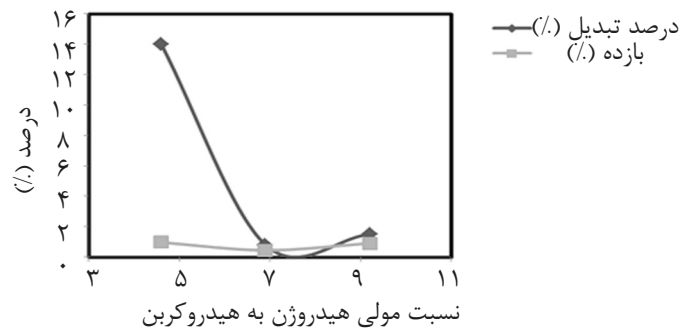
نمودار تغییرات درصد تبدیل و بازده و همچنین انتخاب پذیری محصولات مختلف با فشار واکنش به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ رسم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش فشار، درصد تبدیل نرمال پنتان و انتخاب پذیری نسبت به ایزوپنتان افزایش چشمگیری یافته است. همچنین به دلیل افزایش درصد تبدیل نرمال پنتان و همچنین انتخاب پذیری ایزوپنتان، بازده فرآیند ایزومریزاسیون افزایش یافته است. در مورد علت این پدیده می توان گفت با افزایش فشار، گاز متراکم شده و با پر شدن تمام مکان های کاتالیستی با واکنش گرها، تماس بین بستر کاتالیست و واکنش دهنده ها بیشتر



شکل ۶- تاثیر فشار واکنش بر درصد تبدیل نرمال پنتان و بازده ایزومریزاسیون در دمای 250°C ($\text{WHSV} = 0.2(\text{h}^{-1})$ و $[\text{H}_2/\text{nC}_5 = 14]$)



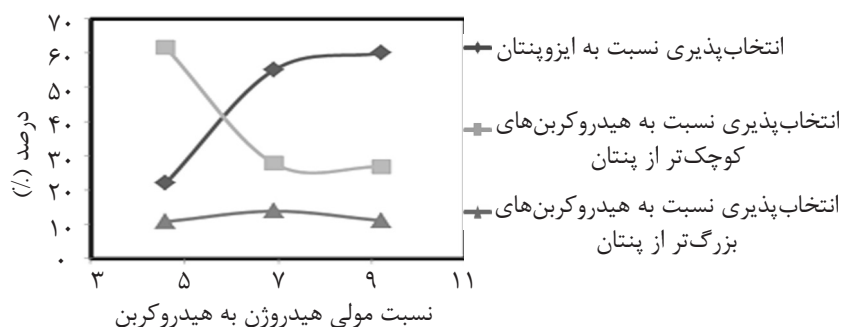
شکل ۷- تاثیر فشار واکنش بر انتخاب پذیری نسبت به محصولات مختلف واکنش در دمای 250°C ($\text{WHSV} = 0.2(\text{h}^{-1})$ و $[\text{H}_2/\text{nC}_5 = 14]$)



شکل ۸- تغییرات درصد تبدیل و بازده فرآیند ایزومریزاسیون نرمال پنتان با نسبت مولی هیدروژن به هیدروکربن در دمای 200°C [فشار اتمسفریک و $\text{WHSV} = 0.2(\text{h}^{-1})$]

یون های کربنیوم یا آلکن ها هستند. آلکن ها با از دست دادن پروتون توسط یون کربنیوم تشکیل می شوند بررسی ها نشان داده است که هیدروژن بهترین بازدارنده واکنش های جانبی است. با افزایش میزان هیدروژن، به دلیل هیدروژن دهی آلکن های موجود در سطح کاتالیست، واکنش های هیدروکراکینگ به صورت قابل ملاحظه ای کاهش یافته و در نتیجه انتخاب پذیری نسبت به ایزوپنتان افزایش می یابد.

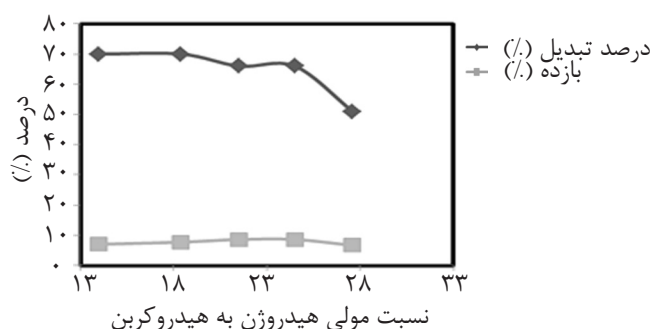
همان طور که ملاحظه می شود، با افزایش میزان هیدروژن، فضای روی کاتالیست توسط هیدروژن اشغال می گردد که منجر به کاهش غلظت آلکن روی سطح کاتالیست و در نهایت کاهش درصد تبدیل می شود. اثر نسبت هیدروژن به هیدروکربن روی انتخاب پذیری نسبت به ایزوپنتان در نسبت های پایین در شکل ۹ ارایه شده است. در ایزومریزاسیون آلکن ها، واکنش های جانبی انتخاب پذیری نسبت به محصولات اصلی را کاهش می دهد. در بیشتر موارد محصولات جانبی



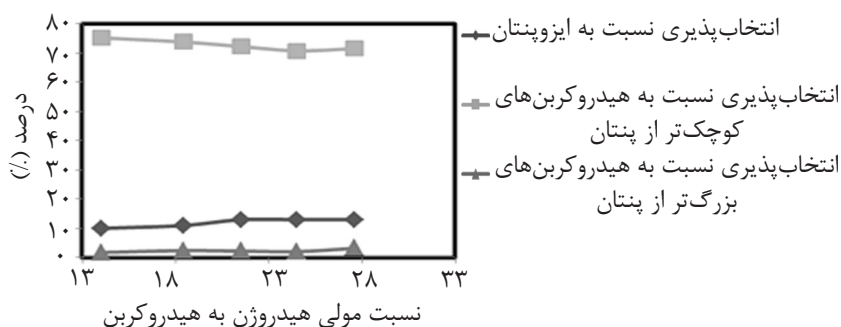
شکل ۹- تغییرات انتخاب پذیری نسبت به محصولات مختلف واکنش با نسبت مولی پایین هیدروژن به هیدروکربن در دمای 200°C (فشار اتمسفریک و $[\text{WHSV} = 0.72(\text{h}^{-1})]$)

هیدروژن، غلظت نرمال پنتان و در نتیجه غلظت آلکن های سطحی در فضاهای فعال کاتالیستی کاهش یافته و به تبع آن درصد تبدیل کاهش می یابد. شکل ۱۱ نیز نشان می دهد که تغییرات میزان هیدروژن تاثیر چندانی روی انتخاب پذیری ایزوپنتان ندارد و افزایش بسیار کمی در انتخاب پذیری نسبت به ایزوپنتان مشاهده می شود.

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، در این حالت در محدوده نسبت هیدروژن به هیدروکربن بالا، در ابتدا با افزایش میزان هیدروژن درصد تبدیل تغییر چندانی نمی کند و می توان گفت به دلیل بالا بودن میزان هیدروژن، فضای سطحی کاتالیست اشباع شده و افزایش نسبت هیدروژن به هیدروکربن تاثیر چندانی در فرآیند ندارد. اما با افزایش بیشتر



شکل ۱۰- تغییرات درصد تبدیل نرمال پنتان و بازده فرآیند ایزومریزاسیون با نسبت مولی بالای هیدروژن به هیدروکربن در دمای 300°C (فشار اتمسفریک و $[\text{WHSV} = 0.72(\text{h}^{-1})]$)



شکل ۱۱- تغییرات درصد تبدیل نرمال پنتان و بازده فرآیند ایزومریزاسیون با نسبت مولی بالای هیدروژن به هیدروکربن در دمای 300°C (فشار اتمسفریک و $[\text{WHSV} = 0.72(\text{h}^{-1})]$)

و انتخاب پذیری نسبت به محصولات مختلف و در نتیجه بازده واکنش دارد. بررسی افزایش دما نشان داد به دلیل گرمازا بودن این فرآیند، دمای پایین

نتیجه گیری

در فرآیند هیدروایزومریزاسیون نرمال پنتان، شرایط عملیاتی تاثیر چشمگیری بر روی درصد تبدیل

هیدروکربن به علت هیدروژناسیون آلکن‌های سطحی در مجاورت سایت‌های اسیدی، انتخاب‌پذیری نسبت به ایزوپنتان افزایش می‌یابد در حالی که به دلیل اشغال سایت‌های فعال با هیدروژن و کاهش غلظت هیدروکربن روی سطح کاتالیست در نسبت‌های بالای هیدروژن به هیدروکربن، درصد تبدیل کاهش می‌یابد.

برای تولید ایزومرهای شاخه‌دار مناسب‌تر است و با افزایش دما انتخاب‌پذیری نسبت به ایزوپنتان کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که افزایش فشار تاثیر مطلوبی بر درصد تبدیل نرمال پنتان و انتخاب‌پذیری نسبت به ایزوپنتان دارد. همچنین مشاهده شد که با افزایش فشار هیدروژن در نسبت‌های پایین هیدروژن به

مراجع

- [1]. Chica A. and Corma A., "Hydroisomerization of pentane, hexane, and heptane for improving the octane number of gasoline", Journal of Catalysis, Vol. 187, pp. 167.-176, 1999.
- [2]. Barcia P. S., Silva J. A. C., and Rodrigues A. E., "Adsorption dynamics of C₅-C₆ Isomeric Fractions in Zeolite Beta for the Octane Improvement of Gasoline", Energy Fuels, Vol. 24, pp. 1931-1940, 2010.
- [3]. Hou Zh., Han B., Zhang J., Liu Zh., He J., Zhang W., and Yang G., "N-Pentane isomerization in different phase regions near the critical temperature", Journal of Supercritical Fluids, Vol. 25, pp. 81-90, 2003.
- [4]. Ono Y., "A survey of the mechanism in catalytic isomerization of alkanes", Catalysis Today, Vol. 81, pp. 3-16, 2003.
- [5]. Kusakari T., Tomishige K., Fujimoto K., "Hydrogen spillover effect on cumene cracking and n-pentane hydroisomerization over Pt/SiO₂+H-Beta", Applied Catalysis A: General, Vol. 224, pp. 219-228, 2002.
- [6]. Brito A., García F. J., Alvarez-Galván M. C., Borges M. E., Díaz C., and de la Peña O'Shea V. A., "Catalytic behaviour of Pt or Pd metal nanoparticles-zeolite bifunctional catalysts for n-pentane hydroisomerization", Catalysis Communications, Vol. 8, pp. 2081-2086, 2007.
- [7]. Soualah A., Lemberton J-L., Pinard L., Chater M., Magnoux P., and Moljord K., "Hydroconversion of n-decane on Pt/HZSM-5 bifunctional catalysts: effect of the Si/Al ratio of the zeolite on selectivities", Reac. Kinet. Mech. Cat., Vol. 101, pp. 209-219, 2010.
- [8]. Kumar N., Nieminen V., Demirkan K., Salmi T., Murzin D. Yu., and Laine E., "Effect of synthesis time and mode of stirring on physico-chemical and catalytic properties of ZSM-5 zeolite catalysts", Applied Catalysis A: General, Vol. 235, pp. 113-123, 2002.
- [9]. López C. M., Guillén Y., García L., Gómez L., and Ramírez Á., "N-Pentane hydroisomerization on Pt containing HZSM-5, HBEA and SAPO-11:", Catalysis Letters", Vol. 122, pp. 267-273, 2008.
- [10]. Weisz P. B., E. W. Swegler "Stepwise Reaction via Intermediates on Separate Catalytic" Centers, Science, Vol. 123, pp. 887-888, 1956.
- [11]. Karimi R., Bayati B., Charchi Aghdam N., Ejtemaee M., and Babaluo A. A., "Studies of the effect of synthesis parameters on ZSM-5 nanocrystalline material during template-hydrothermal synthesis in the presence of chelating agent, Powder Technology", Vol. 229, pp. 229-236, 2012.