

الگوسازی جداسازی انتخابی هیدروژن از مخلوط هیدروکربنی در داخل غشای ژئولیتی MFI

مهرداد مظلومی نیا^{۱*} و نصراله مجیدیان^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

دریافت: آبان ۱۳۹۰، بازنگری: اردیبهشت ۱۳۹۱، پذیرش: تیر ۱۳۹۱

چکیده: در این پژوهش، فرایند جداسازی مخلوطی از ۸ گاز شبیه‌سازی شده‌ی پالایشگاهی شامل، هیدروژن و هیدروکربن‌های سبک (C_1 تا C_4) به‌وسیله‌ی ژئولیت MFI در گستره‌ی دمایی گسترده و نیز فشار خوراک‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. در این بررسی الگوی لانگ مویر بهبود یافته برای الگو کردن اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه‌های جداسازی به واسطه‌ی غشای ژئولیتی با استفاده از الگو، براساس جذب رقابتی هیدروکربن‌ها نسبت به هیدروژن و نفوذ آرایشی^(۱) در حفره‌های ژئولیت، مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های به‌دست آمده از الگو نشان دادند که حالت ناقوسی شکلی در پروفایل دمایی هیدروکربن وجود دارد که به وضوح نشان دهنده‌ی تقابل این دو نیروی محرکه برای تراوش هیدروکربن است. در هر فشار خوراک برای هیدروژن، شاهد افزایش یکنواخت شار با افزایش دما هستیم. افزایش فشار خوراک، پروفایل شار- دما را به سوی افزایش بیشتر شار سوق می‌دهد. در دمای اتاق، شار هیدروژن صفر است. گزینش‌پذیری هیدروژن، وابستگی ضعیفی به فشار دارد.

واژه‌های کلیدی: جداسازی، هیدروژن، هیدروکربن‌های سبک، غشا، ژئولیت MFI، لانگ مویر

مقدمه

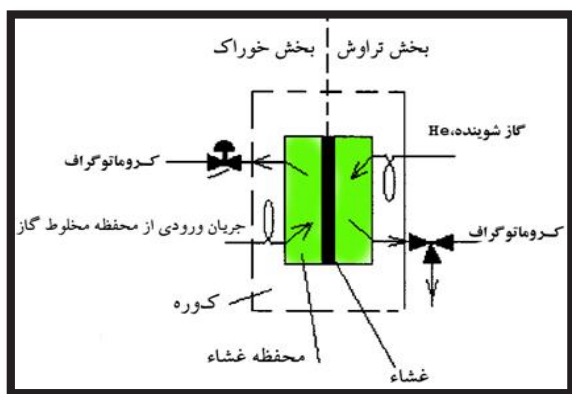
مانند بازیافت هیدروژن در پالایشگاه‌ها استفاده کرد. آزمایش‌های بسیاری در ارتباط با تراوش گاز منفرد و یا ترکیب دوتایی گاز به‌وسیله‌ی غشای ژئولیتی تاکنون صورت گرفته است [۴، ۵ و ۶]. هیدروکربن‌های سبک و نیز گازهای غیرهیدروکربوری به صورت گسترده‌ای در این آزمایشگاه‌ها به کار گرفته شده است چرا که این گازها در صنعت استفاده فراوان دارند. با توجه به شرایط غشاء‌های ژئولیتی MFI (اندازه حفره‌های بسیار کوچک حدود ۰/۵۵ nm) و ویژگی‌های جذب سطحی مطلوب، این نوع از غشا، بسیار برای فرایند جداسازی مخلوط‌های گازی، مناسب است. با توجه به اهمیت یافتن این گونه از فرایندها، لزوم شبیه‌سازی و الگو کردن آن‌ها اهمیت بسزایی می‌یابد. در این بررسی با استفاده از داده‌های

با استفاده از غشاها می‌توان تا حد امکان از تشکیل فاز دوم در جداسازی اجتناب کرد و بدین طریق در مصرف انرژی به صورت قابل ملاحظه‌ای صرفه جویی کرد. امروزه توجه به گروهی از فرایندها جلب شده است که جداسازی را بدون تغییر فاز انجام می‌دهند و در حال حاضر فرایند جداسازی غشایی، کاربردهای فراوانی در صنایع متفاوت از جمله نفت، گاز و پتروشیمی دارد [۱، ۲ و ۳]. در این فرایندها از غشاهایی استفاده می‌شود که با عبور دادن برخی از مولکول‌های خوراک و نگاه داشتن سایر مولکول‌ها، جداسازی را انجام می‌دهند. غشاها بنا بر کاربردهایی که دارند ساخته می‌شوند، از غشاهای جداسازی گاز می‌توان در مواردی

1. Configurational diffusion

رسیده است. جداسازی گاز، در یک گستره‌ی دمایی ۳۰۰-۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در چهار فشار خوراک متفاوت ۰٫۴-۰٫۱ MPa مطالعه و بررسی می‌شود. نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش برای شار هیدروژن و مجموع شارهای هیدروکربن‌های موجود در مخلوط گازی درون جدول ۲ ارایه شده است. از این اطلاعات برای الگوسازی فرایند جداسازی هیدروژن از مخلوط‌های هیدروکربنی استفاده خواهد شد.

آزمایشگاهی و یک الگوی بهبود یافته، کوشش می‌شود فرایند جداسازی هیدروژن از مخلوطی شامل هیدروکربن‌های سبک (C₁ تا C₄) به‌وسیله‌ی زئولیت MFI در گستره‌ی دمایی ۳۰۰-۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و در چهار فشار خوراک متفاوت ۰٫۴-۰٫۱ MPa الگوسازی شود و از هدف‌های این پژوهش، بررسی اثر پارامترهای عملیاتی همچون دما و فشار خوراک بر روی پیشرفت فرایند جداسازی و نیز گزینش‌پذیری هیدروژن است.



شکل ۱ سامانه فرایند [۷]

بخش تجربی

گاز پالایشگاهی شبیه‌سازی شده با کسر مولی واقعی داده شده در جدول ۱ در شرایطی پایدار در یک سامانه چند جزئی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. غشاء زئولیتی در این آزمایش از نوع MFI همراه با پایه α -alumina همراه با ضخامت ۲ mm² است؛ جزئیات شرایط آزمایش در مرجع [۷] آمده است. آزمایش‌ها و مطالعات بر روی جداسازی این گاز، بر اساس افزایش دما و فشار خوراک انجام می‌گیرد. در هر دما و فشار، مقادیر پس از گذشت یک ساعت، اندازه‌گیری می‌شوند تا مطمئن باشیم که سامانه به حالت پایدار

جدول ۱ ترکیب اجزای گاز شبیه‌سازی شده [۷]

اجزاء	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₄ H ₁₀
کسر مولی (%)	۸۴٫۴۸	۷٫۵۹	۲٫۵۱	۲٫۵۲	۰٫۷۵	۱٫۴۵	۰٫۴	۰٫۳

جدول ۲ داده‌های آزمایشگاهی برای شار هیدروژن و هیدروکربن (mol/m².s) (۱۰^{-۵}) [۷]

دما (°C)	فشار (Mpa)							
	۰٫۱		۰٫۱۶۸		۰٫۲۷		۰٫۳۷۲	
	H ₂	HC	H ₂	HC	H ₂	HC	H ₂	HC
۲۵	۰	۲۹٫۵	۰	۳۲٫۵	۰	۴۳٫۸	۰	۴۹٫۹
۷۵	۳۷٫۳	۶۲٫۳	۴۵	۷۷٫۱	۳۲٫۹	۱۱۶٫۲	۲۷٫۹	۱۴۷٫۱
۱۰۵	۹۸٫۹	۸۹٫۸	۹۴٫۸	۸۱٫۱	۱۴۷٫۱	۱۲۴٫۲	۱۷۱	۱۳۱
۱۵۰	-	-	۱۸۳٫۴	۱۷٫۵	۱۶۱٫۸	۵۶٫۶	۳۶۱٫۹	۵۹٫۵
۲۰۰	۱۵۱٫۹	۱۵٫۳	۲۴۹٫۴	۱۶٫۹	۲۳۳٫۷	۳۵٫۲	۳۱۴٫۶	۴۴٫۷
۳۰۰	۳۸۲٫۷	۷۰٫۶	۶۰۱٫۳	۸۷٫۶	۱۳۲۳٫۰	۱۶۰٫۷	۲۲۶۲٫۰	۲۷۲٫۷

الگو سازی

و J_{H_2} به ترتیب شار هیدروکربن و هیدروژن، L ضخامت غشا، D_{HC} و D_{H_2} به ترتیب ضرایب پخش هیدروکربن و هیدروژن، و ε کسری از حفره‌های زئولیت است که خالی از هیدروکربن‌هاست.

$$J_{H_2} = D_{H_2} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\Delta C_{H_2}}{RTL} \quad (1)$$

$$J_{HC} = D_{HC} \frac{\Delta C_{HC}}{RTL} \quad (2)$$

$$\varepsilon = 1 - \theta_{HC} \quad (3)$$

θ کسری از حفره‌های زئولیت است که به‌وسیله‌ی هیدروکربن پر شده است. فشار جزئی هیدروکربن به‌وسیله‌ی معادله لانگ‌مویر می‌تواند به مقدار جذب شده هیدروکربن بر روی غشای زئولیتی مرتبط شود:

$$\theta = \frac{C_{HC}}{C_{HC}^*} = \frac{K_{HC} \cdot P_{HC}}{1 + K_{HC} \cdot P_{HC}} \quad (4)$$

C_{HC}^* حداکثر مقدار جذب شونده HC روی غشاء زئولیت است. K_{HC} ثابت تعادل جذب سطحی HC و همچنین P_{HC} فشار جزئی آن است. در روابط ۱ و ۲ فرض می‌شود نرخ نفوذ هیدروژن در حفره‌های پر شده با هیدروکربن بسیار کمتر از حفره‌های خالی از هیدروکربن است. فشار جزئی H_2 و HC در قسمت شوینده^(۳) در مقایسه با قسمت خوراک^(۴) قابل نظر کردن است و این فرض معتبر است چرا که نرخ تراوش کمتر از ۱۰٪ نرخ خوراک در آزمایش صورت گرفته است. با فرض‌های انجام گرفته برای محاسبه شار هیدروکربن و هیدروژن خواهیم داشت:

$$J_{HC} = D_{HC,app} \cdot \theta_{HC,f} \quad (5)$$

$$J_{H_2} = D_{H_2,app} \cdot (1 - \theta_{HC,f}) \cdot P_{H_2} \cdot f \quad (6)$$

$$\theta_{HC} = \frac{K_{HC} \cdot P_{HC,f}}{1 + K_{HC} \cdot P_{HC,f}} \quad (7)$$

وابستگی دمای، ضریب پخش و ثابت تعادل جذب، به‌وسیله‌ی معادلات آرنیوس و وانت‌هوف تقریب زده می‌شوند.

$$D_{HC,app} = A_{HC} \cdot \exp(-E_{a_{HC}} / RT) \quad (8)$$

$$D_{H_2,app} = A_{H_2} \cdot \exp(-E_{a_{H_2}} / RT) \quad (9)$$

اکنون یک الگوی ساده شده برای بحث روی نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش، ارائه می‌شود. تاکنون تلاش‌های بسیاری برای فهم مکانیسم و توسعه‌ی الگوهای نظری مرتبط با انتقال جرم درون غشاهای زئولیتی صورت گرفته است [۸، ۹ و ۱۰]؛ اگر چه بیشتر کارهای گذشته با مسئله تراوش گازهای تک جزئی سروکار داشته‌اند و کمتر الگوی موفق‌ی تاکنون در گزارش‌ها برای توصیف کمی، انتقال گازهای چند جزئی در داخل غشا ارائه شده است [۱۱]. از جمله دلایل این عدم موفقیت می‌تواند؛ وجود معلومات اندک در زمینه برهم‌کنش ماده جذب شده در برابر ماده جذب شده دیگر^(۱) و نیز برهم‌کنش تعاملی^(۲) مولکول‌های متفاوت در حفره‌های زئولیت، باشد. الگوی تشریح شده در این مقاله بر اساس جذب رقابتی و نفوذ آرایشی از نوع تراوشی در حفره‌های زئولیت است. الگوی مورد استفاده قرار گرفته داده‌های آزمایشگاهی را می‌تواند به یک‌دیگر ارتباط دهد و ویژگی‌های مهم فرایند جداسازی هیدروژن از هیدروکربن‌ها را بر روی غشای زئولیتی MFI، نشان دهد. در این الگو سامانه چند جزئی از گازها را به‌عنوان یک سامانه دوتایی مورد استفاده قرار می‌دهیم. بدین شکل تمامی هیدروکربن‌های موجود در گاز شبیه سازی شده را در مجموع به‌عنوان یک جزء در نظر می‌گیریم و از آن به‌عنوان جزء هیدروکربنی (HC) یاد می‌کنیم. باید توجه کرد جزء هیدروکربنی در غشا با یک مکانیسم جذب - نفوذ عبور می‌کند در حالی که هیدروژن تنها از طریق نفوذ از درون غشا عبور خواهد کرد. به‌طور کلی، الگوی ۵ مرحله‌ای زیر برای توضیح انتقال مولکولی گاز از طریق یک غشاء زئولیتی استفاده می‌شود [۱۲]: جذب از فاز توده به سطح خارجی زئولیت، نفوذ از سطح به داخل کانال‌های زئولیت، نفوذ داخل کانال‌های زئولیت، نفوذ از کانال زئولیت به سطح خارجی، دفع از سطح خارجی به فاز گاز. در جهت توصیف این مکانیسم‌ها الگوی لانگ‌مویر با شرایط فرایند تطبیق داده خواهد شد.

C_{HC} مقدار HC جذب شونده بر واحد حجم غشای زئولیت،

1. Adsorbate-adsorbate interactions 2. Configurational interaction 3. Sweeping side 4. Feed side

گرمای جذبی است که برای تک تک آلکان‌های C_1 تا C_4 بر روی بلورهای سیلیکالیت خالص محاسبه شده به کمک جذب سطحی هم‌دما است (۵۵-۲۰) [۱۳]. این تفاوت به دلیل تفاوت در مواد زئولیت و مواد جذب شده در این دو آزمایش است. زمانی که میزان چشمگیری گرما بر اثر جذب مولکول روی سطح آزاد شود، جذب شیمیایی اتفاق می‌افتد که نیروی جذب بسیار قوی است. ولی زمانی که نیروهای موجود ضعیف تر از حالت قبل بوده و گرمای زیادی حین جذب آزاد نشود، جذب به صورت فیزیکی اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر نیروهای جذب فیزیکی ضعیف تر از شیمیایی هستند. انرژی فعال‌سازی ظاهری برای نفوذ HC ، ۴۹ kJ/mol است. این مقدار در توافق با الگوی نفوذ ترکیبی است که مولکول‌های هیدروکربنی درون کانال‌های غشای زئولیتی برای حرکت از آن بهره می‌برند. اگرچه حرکت مولکول‌های هیدروژن درون حفره‌های غشای زئولیت MFI در رفتاری مشابه نفوذ نادسن^(۱) گزارش شده است؛ مقدار انرژی فعال‌سازی ظاهری برای آن ۹۱ kJ/mol به وسیله‌ی رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید که این مقدار در توافق با رفتار تراوش هیدروژن خالص است [۱۴]. پس از تکمیل الگو و نیز محاسبه پارامترهای لازم از طریق رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی، از نرم‌افزار Matlab جهت ارتباط روابط الگوی ریاضی ایجاد شده؛ استفاده شد.

نتیجه‌ها و بحث

با استفاده از نتیجه‌های آزمایشگاهی و روابط الگوی لانگ مویر می‌توان نتیجه‌های به دست آمده از فرایند جداسازی هیدروژن از مخلوط گازهای سبک پالایشگاهی را پیش‌بینی کرد. این نتیجه‌ها در شکل‌های ۲ تا ۴ نمایش داده شده‌اند. نتیجه‌های به دست آمده بیانگر این موضوع هستند که الگوی توصیف شده در دماهای بالا

$$K = K_0 \cdot \exp(Q_{HC} / RT) \quad (10)$$

انرژی‌های فعال‌سازی ظاهری به ترتیب برای نفوذ هیدروکربن و هیدروژن و گرمای جذب سطحی برای هیدروکربن و همچنین $D_{HC} \cdot app$ و $D_{H_2} \cdot app$ ضریب پخش ظاهری هیدروکربن و هیدروژن است. رابطه کلی برای محاسبه گزینش‌پذیری یک جزء، معادله ۱۱ است که x_i و y_i به ترتیب کسر مولی هیدروژن و هیدروکربن در سیال جاری درون بخش‌های خوراک و تراوش هستند. در اینجا با توجه به الگوی لانگ‌مویر آن را به رابطه ۱۲ تغییر می‌دهیم و برای هیدروژن رابطه گزینش‌پذیری را محاسبه می‌کنیم.

$$s = \frac{\frac{y_i}{1-y_i}}{\frac{x_i}{1-x_i}} \quad (11)$$

$$s_{H_2} = \frac{D_{H_2} \cdot app}{K_{HC} \cdot D_{HC} \cdot app} \quad (12)$$

گزینش‌پذیری هیدروژن (S_{H_2}) مستقل از فشار و ترکیب خوراک است البته اگر عامل‌های $D_{HC} \cdot app$ ، $D_{H_2} \cdot app$ و K_{HC} تنها به دما وابسته باشند. از آنجایی که الگوی لانگ مویر بر پایه مکانیسم جذب - نفوذ توسعه داده شد، بنابراین بحث اصلی بر روی گستره‌ی دمایی ۳۰-۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد که آزمایش در آن صورت گرفت، پر رنگ می‌شود. با انجام رگرسیون بر روی داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده در گستره‌ی دما و فشار فرایند، تمامی اطلاعات لازم برای حل روابط الگو، به دست می‌آید؛ که در جدول ۳ ارایه شده است.

گرمای جذب به دست آمده برای HC حدود ۶۶۳ kJ/mol است. این گرمای جذب (برای سامانه چند جزئی) بزرگتر از

جدول ۳ عامل‌های به دست آمده از رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی

A_{HC}	$1.43 \times 10^{+5}$	A_{H_2}	1.06×10^{-7}	K_0	6.59×10^{-16}
E_{HC}	$49.00 \times 10^{+3}$	E_{H_2}	$91.4 \times 10^{+3}$	Q_{HC}	$663.0 \times 10^{+3}$

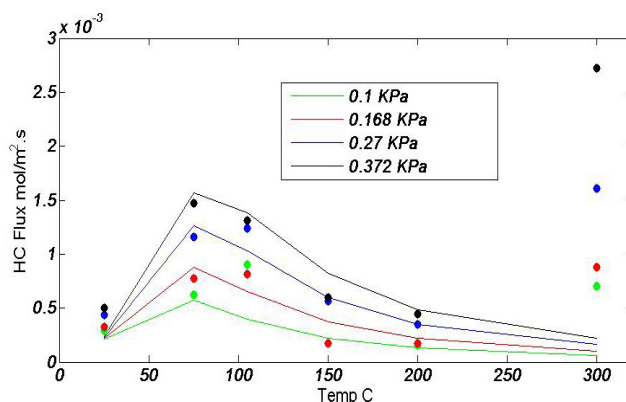
1. Knudsen diffusion

۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) ضعیف عمل می‌کند و به نوعی ویژگی پیش‌گویی خود را از دست می‌دهد؛ ولی برخلاف آن، افزایش فشار تأثیری بر درصد انحراف نتیجه‌های الگو نسبت به نتیجه‌های آزمایشگاهی ندارد.

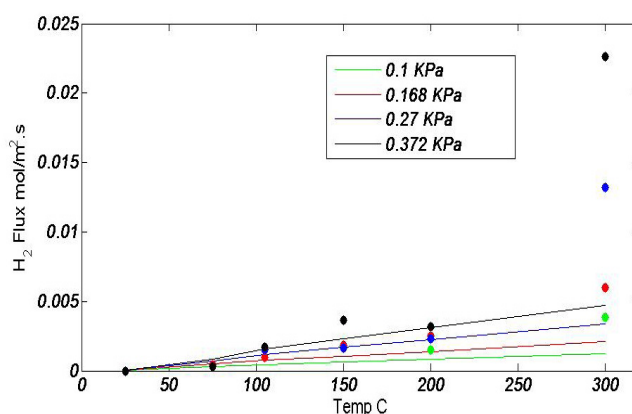
با توجه به کردار شکل ۲ مشخص می‌شود که با افزایش فشار شار HC افزایش می‌یابد و در دمایی حدود ۷۵ °C به بیشینه‌ی خود می‌رسد و از آن به بعد دچار کاهش شار خواهیم شد البته با افزایش فشار، دمای شار بیشینه، اندکی جابه‌جا می‌شود. جذب سطحی HC با افزایش دما کاهش می‌یابد ولی نرخ نفوذ آن افزایش خواهد یافت حالت ناقوسی شکل ایجاد شده در شکل ۲، به وضوح نشان دهنده تقابل این دو نیروی محرکه برای تراوش هیدروکربن است. با توجه به شکل ۳، هر دو عامل فشار و دما در توافق با شار هیدروژن هستند. مشاهده می‌شود در دمای اتاق شار هیدروژن صفر است چرا که حفره‌های ژئولیت در این دما به شدت به وسیله‌ی مولکول‌های هیدروکربنی اشغال شده‌اند.

با توجه به رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ و نیز کردار ترسیم شده در شکل ۴، مشخص می‌شود که گزینش‌پذیری به فشار وابستگی ضعیفی دارد و از این رو تنها یک کردار برای هر ۴ فشار عملیاتی خواهیم داشت. گزینش‌پذیری بسیار اندک هیدروژن در دمای اتاق در شکل ۴ به‌طور کامل محسوس است.

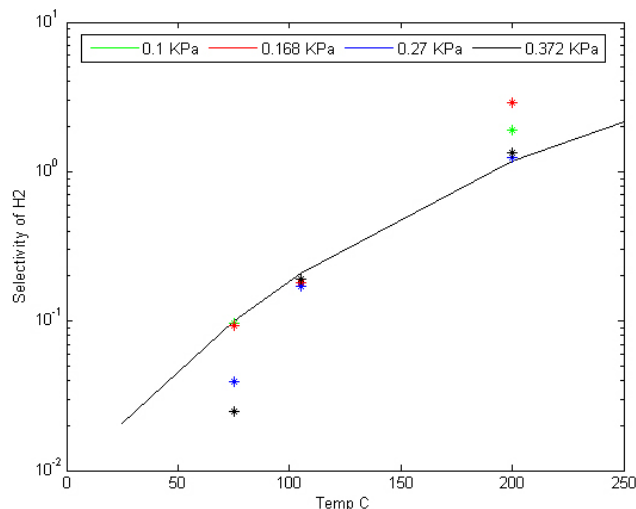
در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، هیدروژن در هیچ یک از گستره‌های فشار خوراک، حضور ندارد. نفوذ هیدروژن، با هیدروکربن‌های جذب شده در منافذ ژئولیتی در دمای پایین، محدود می‌شود ولی به سرعت با افزایش دما، نفوذ آن افزایش خواهد یافت. در دمای ۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد از یک طرف، افزایش فشار خوراک باعث افزایش تفاوت‌های فشار جزئی در طول غشاء برای هیدروژن می‌شود که این امر می‌تواند نفوذ آن را بیشتر کند از طرف دیگر افزایش فشار خوراک، فشار جزئی هیدروکربن‌های قابل جذب را زیاد می‌کند که باعث افزایش جذب آن‌ها بر روی ژئولیت و در نتیجه مسدود شدن منافذ ژئولیتی می‌شود. بنابراین، از نفوذ هیدروژن جلوگیری می‌شود.



شکل ۲ مقایسه شار هیدروکربن در حالت آزمایشگاهی (*) با نتیجه‌های مدل (-)



شکل ۳ مقایسه شار هیدروژن در حالت آزمایشگاهی (*) با نتیجه‌های مدل (-)



شکل ۴ مقایسه گزینش‌پذیری هیدروژن در حالت آزمایشگاهی (*) با نتیجه‌های مدل (-)

هیدروکربن‌های جذب شده در منافذ زئولیتی در دمای پایین، محدود می‌شود و به سرعت با افزایش دما، افزایش می‌یابد.

نتیجه گیری

در دمای 25°C ، هیدروژن در همه‌ی گستره‌های فشار خوراک، حضور ندارد. غشای زئولیتی MFI، یک روش مؤثر و کارآمد جهت جدا سازی مخلوط هیدروژن / هیدروکربن در یک گسترده‌ی دمایی و فشار خوراک است. با توجه به گزینش پذیری خوب هیدروژن نسبت به هیدروکربن‌های سبک در دماهای بالا از غشای زئولیتی می‌توان درون راکتورهای غشائی برای جداسازی هیدروژن از مخلوط گازهای هیدروکربنی استفاده کرد.

الگوی لانگ مویری که بر اساس جذب- نفوذ نوشته شود می‌تواند در گستره‌ی دمایی $200-25$ درجه سانتیگراد، فرایند جداسازی هیدروژن از مخلوط هیدروکربن‌های سبک (شامل C_1 تا C_4) به‌وسیله‌ی زئولیت MFI، را پیش بینی کند و تنها در دماهای بالاتر از این کاربرد ندارد.

در دماهای بالای 200 درجه‌ی سانتی‌گراد، جذب هیدروکربن‌ها روی زئولیت MFI ناچیز می‌شود و فرایند، توسط نفوذ کنترل می‌شود. در 300 درجه‌ی سانتی‌گراد، فلاکس همه‌ی اجزاء با افزایش فشار جریان بالا دست، افزایش می‌یابد ولی شار هیدروژن در دو فشار انتهایی بیش از ۸ برابر شار جزء دیگر خواهد شد. بنابراین، افزایش فشار نیز کمکی به نفوذ بیشتر هیدروکربن‌ها نخواهد کرد. در دماهای بالا، غشای زئولیت، نسبت به هیدروژن نفوذ گزین می‌شود و این با نتیجه‌های به‌دست آمده در دماهای پایین بسیار متفاوت است. در دمای بالا، فاکتور جداسازی برای هیدروژن تحت هر دو فشار خوراک، بالاتر از ۳ است. هنگامی که جذب سطحی زئولیت در 300 درجه‌ی سانتی‌گراد برای اجزای هیدروکربن، اندک است، تراوش گاز به‌وسیله‌ی پدیده‌ی نفوذ گاز در منافذ زئولیتی تفسیر می‌شود. پس سرعت تراوش بیشتر برای مولکول‌های سبک‌تر یا کوچک‌تر، ناشی از نفوذ بیشتر در منافذ زئولیت است. با توجه به شکل ۴ که گویای افزایش گزینش‌پذیری هیدروژن در دمای بالا است می‌توان نتیجه گرفت که نفوذ هیدروژن به‌وسیله‌ی

مراجع

- [1] Haelssig, J. B.; Tremblay, A. Y.; Thibault, Jang.; J. Memb. Sci.; 381, 226-236; 2011.
- [2] Hosseini, S. S.; Peng, N.; Chung, T. Sh.; J. Memb. Sci.; 349, 156-166; 2010.
- [3] Haelssig, J. B.; Tremblay, A. Y.; Thibault, J.; Huang, X. M.; J. Memb. Sci.; 381, 226-236; 2011.
- [4] An, W.; Swenson, P.; Waller, T.; J. Memb. Sci.; 369, 414-419; 2011.
- [5] Shafie, A. H.; An, W.; Hejazi, A. H.; Sawada, J. A.; Sep and Pur Tech.; 88, 24-28; 2012.
- [6] Sandström, L.; Lindmark, J.; Hedlund, J.; J. Memb. Sci.; 360, 265-275; 2010.
- [7] Dong, J., Lin, Y. S. Wei Liu ; AIChE . J. ; 46, 1957-1966; 2000.
- [8] Wee, Sh. L., Tye, Ch.T, Bhatia. S.; Sep and Pur Tec.; 63, 500-516; 2008.
- [9] Merdaw, A.A., Sharif, A.O., Derwish, G.A.W; Chem. Eng. J.; 168, 215-228; 2011.
- [10] Merdaw, A.A., Sharif, A.O., Derwish, G.A.W; Chem. Eng. J.; 1688, 229-24; 2011.
- [11] Gandía, F. J., Murcia, Á. B., Castelló, D. L., ; J. Memb. Sci.; 378, 407-414; 2011.
- [12] Jareman, F., Hedlund, J., Creaser. D; J. Memb. Sci.; 236, 81-89; 2004.
- [13] Sun, M. S.; Shah, D. B.; Xu, H. H.; Talu, O.; J. Phys. Chem. B.; 102, 1466-1480; 1998.
- [14] Burggraaf, A. J.; Vroon, Z. A.; Keizer, K.; Verweij, H.; J. Memb. Sci.; 144, 77; 1998.