

جداسازی اکسیژن از هوا به روش جذب سطحی با تناوب فشار

لیلا فتحی؛ جعفر توفیقی*

دانشکده مهندسی، بخش مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

مسعود مفرحی

دانشکده مهندسی، بخش مهندسی شیمی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله :

دریافت ۲۱ مرداد ۱۳۸۷

دریافت پس از اصلاحات ۱۷ مهر ۱۳۸۷

پذیرش نهایی ۱۴ آذر ۱۳۸۷

کلمات کلیدی :

جذب سطحی با تناوب فشار

جداسازی اکسیژن

زئولیت 5A

چکیده

فرآیند جذب سطحی با تناوب فشار یک واحد عملیاتی مهم برای جداسازی و خالص سازی گازها به شمار می رود. به منظور توسعه این فرآیند یک طرح نیمه صنعتی شامل ۴ بستر جذب به طول یک متر و قطر ۳/۵ سانتیمتر ساخته شد. این طرح نیمه صنعتی مجهز به سیستمهای کنترل و آنالیز برای بررسی دقیق شرایط عملیاتی مختلف بسترها می باشد. به منظور آزمایش این طرح نیمه صنعتی، جداسازی اکسیژن از هوا به کمک جاذب زئولیت 5A مطالعه گردید. این فرآیند شامل مراحل جذب، یکسان سازی فشار (دو مرحله)، تخلیه، پاکسازی و افزایش فشار در هر سیکل می باشد. تاثیر پارامترهای فشار، زمان سیکل، دبی جریان خوراک و جریان زدایش بر میزان خلوص و بازیابی محصول مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، مدلسازی و شبیه سازی این فرآیند با بکارگیری روش با هم گذاری متعامد و استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شد. نتایج عددی بدست آمده از مدلسازی در مقایسه با داده های آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی را بدست داده است.

حقوق ناشر محفوظ است.

* عهده دار مکاتبات

جاذب زئولیت 5A و روش جذب با تناوب فشار بررسی شده است. برای بدست آوردن محصول غنی از اکسیژن از ۴ بستر به همراه ۷ مرحله عملیاتی [۹] استفاده می شود. در قسمت تجربی، برای تحقیق در خصوص عملکرد جاذب در پایلوت، تأثیر پارامترهایی نظیر مقدار محصول و خوراک، فشار و مدت زمان سیکل، و میزان زدایش در نظر گرفته شده است. در بخش تئوری، مدل سازی فرایند با استفاده از نرم افزار MATLAB و روش ریاضی با هم گذاری متعامد صورت گرفته است. در نهایت عملکرد پایلوت در هر دو قسمت با یکدیگر مقایسه شده است.

۲ - واحد نیمه صنعتی جذب سطحی با تناوب فشار

به منظور توسعه فناوری جذب تناوبی فشار یک واحد نیمه صنعتی PSA با چهار بستر برای جداسازی گازها طراحی و ساخته شد. این پایلوت در ابعاد آزمایشگاهی، از قابلیت تعویض و کنترل کلیه خطوط جریان و نیز از قابلیت تغییرات مختلف فرآیند PSA برخوردار می باشد. سیستم کنترل و نرم افزار به کار گرفته شده در این پایلوت و سایر قابلیت های تعبیه شده بر روی آن مراحل متعدد جذب تناوبی فشار را ایجاد می نماید. زمان هر یک از مراحل سیکل تناوبی، جریان، فشار و درجه حرارت ستون جذب کنترل و ثبت می گردد. این واحد نیمه صنعتی به طور کلی از پنج بخش خوراک، بسترها، تنظیم فشار، کنترل و آنالیز تشکیل شده است.

در قسمت خوراک برای تغییرات نوع خوراک یک سیستم مخزن خوراک با حجم متغیر جهت تغذیه خوراک طراحی شده است. جهت افزایش فشار خوراک نیز از یک دستگاه کمپرسور تا فشار ۱۱ بار استفاده می شود. برای اطمینان از عاری بودن گاز خروجی کمپرسور از رطوبت و روغن از دو جداکننده آب و روغن و یک بستر خشک کننده استفاده شده است.

در شکل (۱) طرح فرآیند جداسازی اکسیژن از هوا و در شکل (۲) نمایی از واحد نیمه صنعتی جذب سطحی با تناوب فشار نشان داده است. بسترهای استفاده شده در این طرح از جنس استیل به ارتفاع یک متر و قطر ۲/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است که این قابلیت را بوجود می آورد تا از طیف وسیعی از انواع جاذبها بتوان در آن استفاده کرد. بسترهای شماره ۲ و ۳ و ۴ از یک استوانه یک متری یک دست ساخته شده اند، درحالیکه بستر شماره ۱

فرآیند جذب سطحی با تناوب فشار (Pressure Swing Adsorption, PSA) یک واحد عملیاتی گسترده برای جداسازی و خالص سازی گازها است که برپایه قابلیت جذب سطحی جامدات و نگه داشتن انتخابی گازها عمل می کند. مهمترین پارامتر عملیاتی در این سیستم فشار است و بیشتر واحدهای صنعتی در دمای محیط و یا نزدیک دمای محیط عمل می کنند. در فرآیند های جذب سطحی انتخاب روش احیا برای هر سیستم بستگی به فاکتورهای اقتصادی و مشخصات تکنیکی مورد نظر دارد [۱]. اصطلاح تناوب فشار از روش احیا بسترها که کاهش و تناوب فشار می باشد، گرفته می شود. این فرآیند اولین بار در سال ۱۹۵۸ توسط Skarstrom برای خشک کردن هوا ابداع شد. این سیستم از دو بستر که متناوباً فشارزنی و فشارزدایی می شدند، تشکیل شده بود [۲].

افزایش تقاضای هیدروژن برای تصفیه نفت خام و فرآیندهای پتروشیمی، هیدروژناسیون و هیدروکراکینگ و سنتزهای آمونیاک و متانول، شیشه سازی، صنایع غذایی و ... محرکهای بسیار قوی برای توسعه فرآیند PSA بوده اند و امروزه این فرآیند در حوزه وسیعی از فرآیندها نظیر: خشک کردن هوا، تخلیص گازهای طبیعی و انواع گازهای صنعتی، جداسازی هیدروژن از مخلوطهای هیدروکربنی، جداسازی اجزای هوا، جداسازی پارافینهای نرمال از ایزوپارافینها و آروماتیکها و بازیابی حلال و ... کاملاً شناخته شده است و در مقایسه با سایر روشهای متداول جداسازی به خصوص برای ظرفیتهای بالاتر و درجه خلوص بیشتر ترجیح داده می شود [۳].

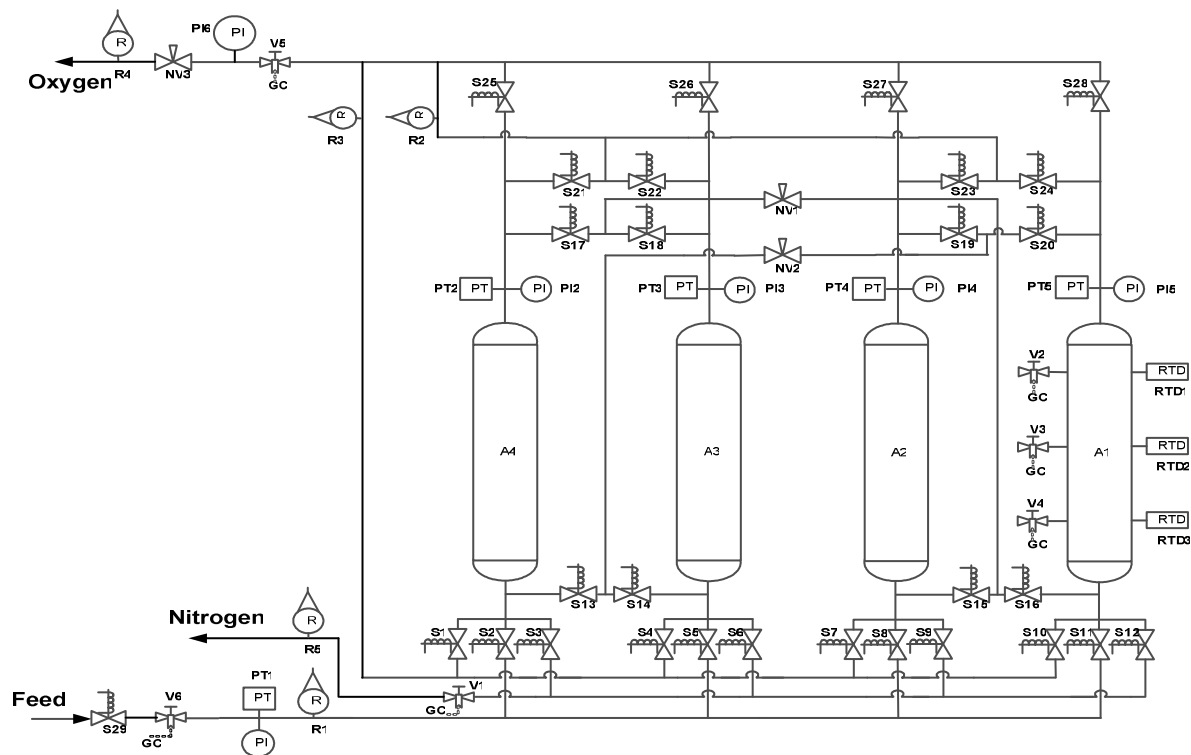
در زمینه جداسازی اکسیژن از هوا، تحقیق و مطالعه روی این فرآیند از دهه های ۵۰ و ۶۰ آغاز شد و از دهه ۷۰ این فرآیندها تجاری شدند [۴]، [۵]. اما به دلیل اینکه جذب انتخابی نیتروژن نسبت به اکسیژن بر روی جاذبهای معمول چندان بالا نیست، لذا جداسازی هوا در مقایسه با فرآیندهای دیگر نظیر خشک کردن هوا، تخلیص هیدروژن و جداسازی پارافینهای نرمال مشکلتر است [۶]، [۷]. برای تولید اکسیژن در دبی های کمتر از ۴۰ تن در روز، فرآیند PSA نسبت به روشهای دیگر نظیر تقطیر سرمایشی اقتصادی تر است [۸].

در این مقاله جداسازی اکسیژن از هوا با استفاده از

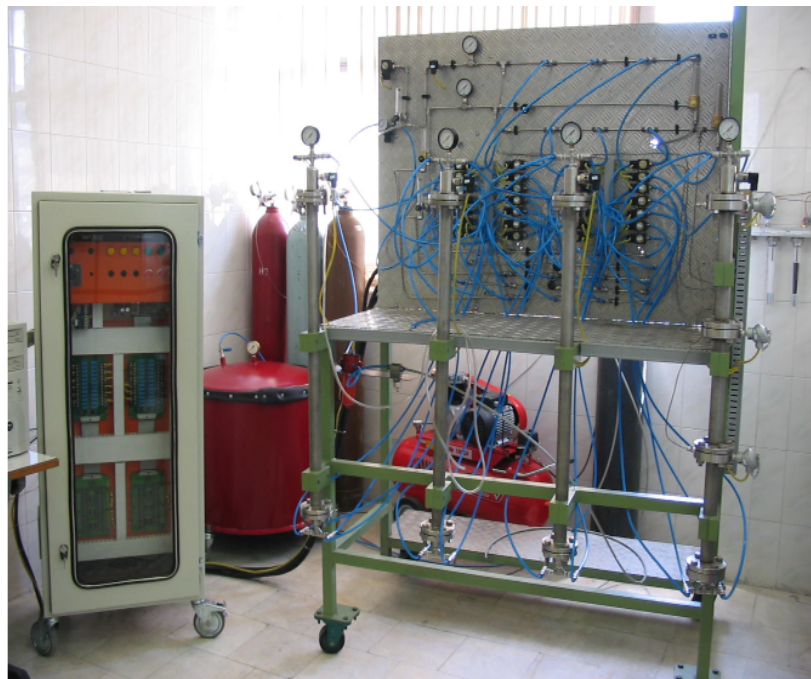
در فرآیندهای PSA کنترل فرآیند یکی از مهمترین بخشهای عملیات می باشد، زیرا هم از نظر نمایش و ثبت اجزاء عملیات و هم از نظر تنظیم مراحل دینامیک فرآیند و کنترل عملیات، حائز اهمیت خواهد بود. در این طرح یک سیستم کنترل On/Off به همراه برد کنترل و نرم افزاری که سیگنالهای مربوط به سنسورهای فشار و درجه حرارت را به داده های قابل پردازش در کامپیوتر مبدل می نماید، طراحی و ساخته شده است. مجموعه عملیات مورد نظر در این پایلوت شامل قطع و وصل کردن شیرهای سلونوئیدی، نمایش دمای بستر در سه نقطه، فشار بسترها و فشار جریانهای ورودی و خروجی و کنترل On/Off در یک حلقه کنترل می باشند. به منظور انجام عملیات با ایمنی و دقت بیشتر در این پایلوت از یک سیستم کنترل اتوماتیک استفاده شده است. با توجه به تعداد زیاد سیگنالها و همچنین اهداف تحقیقاتی مورد نظر، سیستم مورد استفاده بوسیله نرم افزار طراحی شده کنترل می شود. همچنین جهت آنالیز گازهای ورودی و خروجی از سیستم در این طرح از یک دستگاه GC مدل ۲۸۰۰ شرکت واریان استفاده شده است.

از سه قسمت مجزا که با یکدیگر بوسیله فلنج متصل شده اند تشکیل شده است. این بستر امکان بررسی ها و مطالعات آزمایشگاهی روی سه نقطه داخل بستر از نظر درجه حرارت و همچنین آنالیز غلظت اجزاء تشکیل دهنده را بوجود می آورد. روی هر بستر یک نمایش دهنده فشار PI و یک ترانسسمیتر فشار برای نمایش و ثبت مقدار اندازه گیری شده نصب شده است. همچنین روی بستر شماره ۱ در سه نقطه معین سه RTD برای اندازه گیری درجه حرارت و سه شیر سوزنی برای آنالیز غلظت اجزاء پیش بینی شده است.

قسمت تنظیم فشار و راهبری مراحل مختلف تناوب فشار توسط ۲۹ شیر برقی و همچنین یک رگلاتور فشار که روی خط خوراک قرار داده شده است انجام می گیرد. فشار خط محصولات توسط یک شیر سوزنی و بصورت دستی تنظیم می شود. جریان گاز روی خطوط خوراک و محصولات و همچنین جریان زدایش و جریان فشارزنی ستون توسط فلومترهای گاز، تنظیم و نمایش داده می شود.



شکل (۱): نمودار فرآیند جداسازی اکسیژن از هوا



شکل (۲): نمایی از طرح نیمه صنعتی جذب سطحی با تناوب فشار

شود فشارش را به بستر دیگر که باید به فشار بالا برسد انتقال می دهد. در این حالت گرادیان فشار دو مرحله ای است و جاذب کمتر مورد آسیب قرار می گیرد و همچنین بار کمپرسور و به تبع انرژی مصرفی کمتر خواهد بود.

تخلیه

در این مرحله عمل تخلیه در خلاف جهت جریان خوراک به بستر انجام می گیرد که در این حال جزئی که جذب بیشتری دارد (نیتروژن) به عنوان محصول فرعی بدست می آید. تخلیه با جریان غیر هم جهت با خوراک باعث می شود ترکیبی که قویتر جذب شده به سمت ورودی بستر رفته و محصول را در سیکل بعدی آلوده نمی کند.

پاکسازی

عمل پاکسازی بستر توسط محصول اصلی صورت می گیرد. جزئی از جریان محصول پس از کاهش فشار، در جهت عکس ورود خوراک وارد بستر شده و بستر را پاکسازی می کند.

پس از طی مراحل بالا اکسیژن و نیتروژن از خطهای محصول اصلی و فرعی خارج می شوند. در بالای هر بستر یک فشارسنج و نیز یک ترانسسمیتور فشار نصب شده است که از طریق آن می توان نمودار تغییرات فشار را

۳- شرح فرآیند

در این فرآیند گاز از طریق مخزن خوراک به کمک کمپرسور از خط خوراک وارد سیستم می شود و بسترها جهت رسیدن به محصولی با خلوص بالا مراحل مختلف جذب، یکسان سازی فشار، تخلیه، پاکسازی و افزایش فشار را طی می کنند. این مراحل به شرح زیر هستند:

فشارزنی با خوراک و محصول

در این مرحله عمل فشارزنی بستر صورت می گیرد که این امر ابتدا توسط خوراک و سپس توسط محصول انجام می شود. استفاده از محصول درصد خلوص نهایی را افزایش می دهد.

جذب

در این مرحله عمل خوراک زنی و جذب انجام می گیرد. خوراک در فشار بالا وارد بستر شده و جزئی که قابلیت جذب کمتری دارد به عنوان محصول اصلی جدا می شود.

تعدیل فشار

در این مرحله بستری که در فشار بالا قرار دارد به بستر دیگر که در فشار پایین قرار دارد، متصل می شود. به این ترتیب بستری که ابتدا فشار بالا داشته و باید تخلیه

روی کامپیوتر مشاهده کرد. مدت زمان هر سیکل و زمان هر مرحله با نرم افزار تنظیم می شود. برای کنترل شدت جریان خوراک و محصول از پنچ فلومتر استفاده شده است. فلومتر R۱ وظیفه نمایش میزان خوراک ورودی به سیستم را به عهده دارد و فلومترهای R۴ و R۵ به ترتیب میزان محصول اصلی و فرعی را نشان می دهند. برای تنظیم مقدار جریان زدایش از فلومتر R۲ و برای کنترل جریان در مرحله فشارزنی با محصول از فلومتر R۳ استفاده می شود. فشارسنجهای PI۱ و PI۶ به ترتیب فشار خط خوراک و محصول اصلی را نشان می دهند. فشار خط محصول با شیر دستی NV۳ تنظیم می شود. همچنین شیردستی های NV۱ و NV۲ جهت کنترل مراحل یکسان سازی فشار مورد استفاده قرار می گیرند.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + C_i \frac{\partial V}{\partial z} + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right) \left(\frac{\partial q_A}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial t}\right) = 0 \quad (2)$$

برای فاز جامد در بستر روابط سرعت و انتقال جرم عبارتند از:

$$\frac{\partial q_A}{\partial t} = k_A (q_A^* - q_A) \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_B}{\partial t} = k_B (q_B^* - q_B)$$

و روابط تعادلی مطابق ایزوترم لانگمویر دو جزئی:

$$q_A^* = \frac{b_A q_{AS} C_A}{1 + b_A C_A + b_B C_B} \quad (4)$$

$$q_B^* = \frac{b_B q_{BS} C_B}{1 + b_A C_A + b_B C_B} \quad (5)$$

شرایط مرزی برای مراحل مختلف در جدول (۱) ارائه شده اند.

شرایط اولیه نیز با فرض بسترهای تمیز عبارتند از:

$$C_i(z, t = 0) = 0 \quad (6)$$

$$q_i(z, t = 0) = 0 \quad (7)$$

با استفاده از روابط و شرایط مرزی ذکر شده، معادلات برای هر مرحله نوشته شده و با استفاده از روش ریاضی با هم گذاری متعامد (Orthogonal Collocation) حل شده اند. این روش معمولاً برای حل مسائل با مقادیر مرزی استفاده می شود و به واسطه دقت مناسب، قابلیت همگرایی بالا و سهولت انجام محاسبات در مقایسه با سایر روشهای حل عددی مانند روش تفاضل محدود از سرعت بیشتری برخوردار است [۱۳]. در این کار با توجه به نوع شرایط مرزی موجود در مدلسازی از روش Finlayson و ۵ نقطه Collocation (۳ نقطه داخلی و ۲ نقطه مرزی) استفاده شده است. با این روش، معادلات مدل از نوع پاره ای به معادلات معمولی تبدیل شده و سپس این معادلات با استفاده از روشهای عددی موجود در نرم افزار MATLAB حل شده اند. پارامترهای مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده اند.

۴- تئوری مدل

طراحی و بهینه سازی فرآیند جذب سطحی با تناوب فشار مستلزم داشتن مدل ریاضی و بررسی پارامترهای مختلف است. در این تحقیق نیز برای نتیجه گیری بهتر از نتایج تجربی، مدلسازی فرآیند با استفاده از مدل‌های موجود در منابع صورت گرفته است [۱۰-۱۲].

فرضیات مورد استفاده در مدلسازی عبارتند از:

- ۱- سیستم ایزوترم فرض می شود.
 - ۲- روابط تعادلی برای اکسیژن و نیتروژن بوسیله ایزوترم لانگمویر دو جزئی بیان می شوند.
 - ۳- سرعت انتقال جرم توسط روابط نیروی محرکه خطی (LDF) بیان می شود.
 - ۴- از مقدار آرگون که همراه اکسیژن محصول خارج می شود صرف نظر می گردد.
- بر طبق این فرضیات می توان رفتار دینامیکی سیستم را به صورت معادلات زیر بیان کرد.

معادله موازنه جرم جزئی در فاز گاز عبارتست از:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} - D_L \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + V \frac{\partial C_i}{\partial z} + C_i \frac{\partial V}{\partial z} + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right) \frac{\partial q_i}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

و موازنه کلی:

¹ Linear Driving Force

جدول (۱): شرایط مرزی مراحل مختلف سیکل تناوبی

مراحل سیکل تناوبی	روابط غلظت	روابط سرعت
جذب	$-D_L \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=0^+} = V \Big _{z=0} (C_i \Big _{z=0} - C_i \Big _{z=0^+})$ $\frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=L} = 0$	$V \Big _{z=0} = V_{OH}$
تعادل فشار به فشار کمتر	$\frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=0} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=L} = 0$	$V \Big _{z=0} = 0$
تخلیه	$\frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=0} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=L} = 0$	$V \Big _{z=L} = 0$
پاکسازی	$-D_L \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=L^-} = V \Big _{z=L} (C_i \Big _{z=L} - C_i \Big _{z=L^-})$ $\frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=0} = 0$	$V \Big _{z=L} = V_{OL}$
تعادل فشار به فشار بیشتر	$-D_L \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=0^+} = V \Big _{z=0} (C_i \Big _{z=0} - C_i \Big _{z=0^+})$ $\frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=L} = 0$	$V \Big _{z=L} = 0$
فشارزنی توسط محصول	$-D_L \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=0^+} = V \Big _{z=0} (C_i \Big _{z=0} - C_i \Big _{z=0^+})$ $\frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=L} = 0$	$V \Big _{z=L} = 0$
فشارزنی توسط خوراک	$-D_L \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=0^+} = V \Big _{z=0} (C_i \Big _{z=0} - C_i \Big _{z=0^+})$ $\frac{\partial C_i}{\partial z} \Big _{z=L} = 0$	$V \Big _{z=L} = 0$

جدول (۲): مشخصات جاذبها و پارامترهای مورد استفاده در مدل

Feed Composition	Nitrogen 79%, Oxygen 21%
Adsorbent	5A zeolite
Particle size	1/16 inch
Particle shape	Pellet
Particle density	670 gr/lit
Column length	100 cm
Column diameter	3.5 cm
Bed voidage	0.4

بدست آمده از هر جریان انجام شده است.

۵- آزمایشات

خوراک هوا به صورت پیوسته وارد فرآیند شده و به نوبت جهت تفکیک و جداسازی به هر یک از بسترها هدایت می‌شود. تقسیم توالی هر یک از مراحل پیش‌بینی شده به عنوان یک پارامتر طراحی جهت اعمال تغییرات قابل اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. آزمایشات براساس تغییرات فشار مرحله جذب، میزان جریان زدایش، زمان سیکل و میزان جریان خوراک وارد شده، تنظیم شده اند. با توجه به اطلاعات موجود در منابع، فشار عملیات در محدوده ۲/۵ تا ۵ بار و درجه حرارت بسترها در شرایط آزمایشگاه در نظر گرفته شده است.

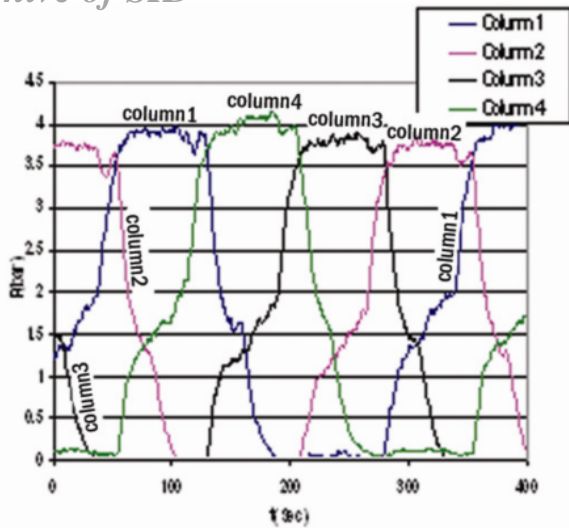
به منظور بررسی دقت نتایج، آزمایشها حداقل سه بار تکرار شده و از آزمایشاتی که میزان خطای آنها از حد قابل قبول بیشتر بوده است نیز صرف‌نظر شده است. همچنین برای صحت آزمایشات، موازنه جرم در هر آزمایش توسط اندازه‌گیری جریانها و آنالیز

۶- ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

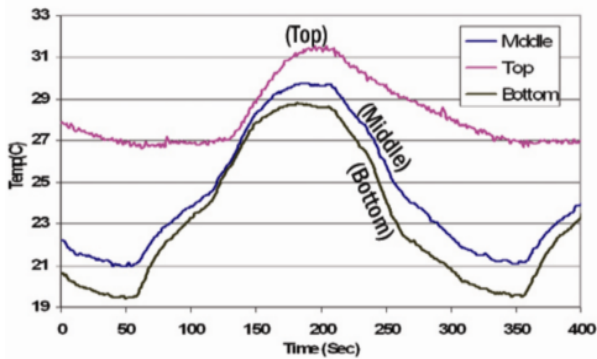
همانگونه که ذکر شد آزمایشات در سه فشار ۲/۵ ، ۳/۵ و ۴/۵ بار انجام شده‌اند. همچنین برای بررسی اثر زمان سیکل، در هر یک از فشارهای ذکر شده آزمایشات در زمانهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ ثانیه انجام شدند. در هر گروه از آزمایشات سعی شده است که اثر تغییرات جریان خوراک و جریان زدایش نیز بر پارامترهای دیگر بررسی شود. از آنجا که در فرآیندهای PSA عملکرد سیستم بر اساس دو پارامتر خلوص و بازدهی نسبت به یکدیگر بیان می‌شود، در اینجا نیز سعی شده است آزمایشات به صورتی هدایت شود که تا حد امکان علاوه بر خلوص بالای محصول، میزان بازیابی نیز تا حد قابل قبولی بالا باشد. در جدول (۳) نتایج تجربی و شبیه سازی برای تعدادی از آزمایشات انجام شده، ارائه شده اند.

جدول (۳): نتایج حاصل از آزمایشات و شبیه سازی عملکرد پایلوت جداسازی اکسیژن

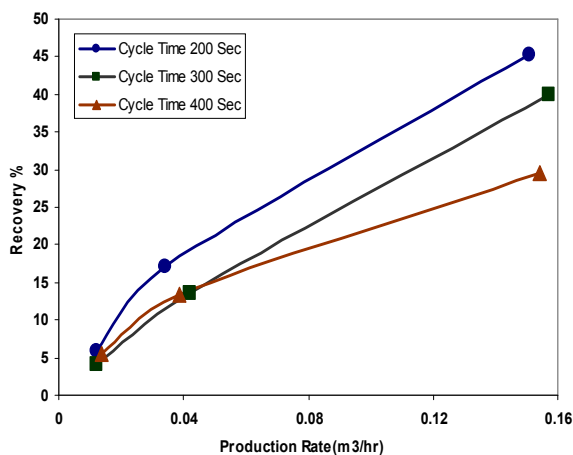
Run	Press (bar)	Time (Sec)	Feed (m3/hr)	Purge (m3/hr)	%Purity		%Recovery	
					Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
1	2.5	200	0.762	0.288	85.45	79.05	13.12	17.05
2	2.5	200	0.796	0.288	91.98	87.22	8.56	5.96
3	2.5	200	0.896	0.288	59.58	56.35	42.22	45.29
4	2.5	300	0.774	0.288	38.25	41.39	38.5	40.04
5	4.5	300	0.811	0.300	62.76	57.29	25.32	27.38
6	3.5	300	0.804	0.390	46.42	42.77	5.34	6.56
7	4.5	300	1.018	0.504	43.5	41.13	13.67	15.83
8	4.5	300	1.214	0.504	40.2	41.4	46.39	42.44
9	4.5	300	1.617	0.504	44.68	42.2	76.84	81.8
10	2.5	400	0.528	0.288	50.6	44.65	7.52	5.47
11	2.5	400	0.562	0.288	43.24	40.51	15.23	13.33
12	2.5	400	0.685	0.288	25.73	27.64	27.61	29.56
13	3.5	400	0.74	0.370	27.5	26.47	8.64	10.1
14	3.5	400	0.73	0.390	34.23	31.47	5.61	5.78
15	3.5	400	0.74	0.330	40.15	42.6	27.34	28.12



شکل (۳): منحنی تغییر فشار بسترها نسبت به زمان در سیکل ۳۰۰ ثانیه ای



شکل (۴): منحنی دما در سه نقطه از بستر از زمان در سیکل ۳۰۰ ثانیه ای.



شکل (۵): تغییرات میزان بازیابی بر حسب شدت جریان محصول در فشار ۲/۵ بار و سیکلهای ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ ثانیه ای

در شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات میزان بازیابی و درصد

یک نمونه از منحنی فشار بسترها و منحنی دما در سه نقطه از بستر یک در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده است. به دلیل تغییر فشار در بستر در مراحل مختلف فرآیند جذب سطحی با تناوب فشار، منحنی‌های فشار به شکل افزایشی و کاهششی است. این منحنی در مراحل فشارزنی با خوراک و محصول و تعادل فشار به فشار بیشتر، افزایشی و در مراحل تخلیه و تعادل فشار به فشار کمتر، کاهششی است. در دو مرحله جذب و پاکسازی، فشار ستونها ثابت می‌ماند.

با ادامه عملیات و سیکلهای بعدی روند تغییرات به همان شکل تکرار می‌شود. از آنجایی که بسترها مشابه یکدیگر بوده و یکسان عمل می‌کنند، منحنی فشار برای تمام بسترها مشابه یکدیگر است. همانگونه که مشاهده می‌شود تغییرات دما نیز مانند تغییرات فشار به صورت افزایشی و کاهششی است، که علت این امر به دلیل تغییر فشار ستون و مقدار جزئی گرمای جذب است. در منحنی دما در ستونهای پر شده از جاذب، از پایین به بالای ستون دما افزایش می‌یابد که دلیل این امر این است که منطقه پیشانی جذب در بالای ستون کنترل می‌شود تا از حد اکثر ظرفیت ستون جذب استفاده گردد.

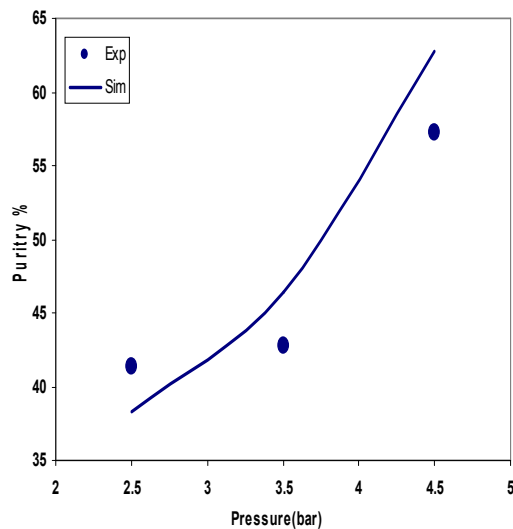
در سیستم‌های جداسازی PSA برای بررسی عملکرد فرآیند معمولاً از منحنی‌های تغییرات درصد خلوص محصول^۱ و میزان بازیابی^۲ بر حسب پارامترهای عملیاتی استفاده می‌شود. منظور از درصد خلوص محصول، درصد اکسیژن موجود در محصول اصلی است و درصد نسبت میزان اکسیژن موجود در محصول به میزان اکسیژن موجود در خوراک میزان بازیابی نامیده می‌شود.

نتایج تجربی مقایسه تغییرات میزان بازیابی بر حسب شدت جریان محصول در مقدار جریان زدایش ثابت در شکل (۵) به نمایش در آمده است. چنانچه در این شکل دیده می‌شود میزان بازیابی محصول برای همه سیکلهای با افزایش مقدار تولید افزایش می‌یابد اما در سیکلهای کوتاهتر (سیکل ۲۰۰ ثانیه) میزان بازیابی محصول بیشتر است.

¹ Purity
² Recovery

بیشینه خود را خواهد داشت. در شکل (۷) این نقطه به خوبی مشخص است. در این نقطه مقدار خوراک در حدود ۰/۷۹ مترمکعب بر ساعت و درصد خلوص نیز در حدود ۸۸ درصد می‌باشد. در شکل (۶) نسبت عکس میزان بازیابی و درصد خلوص در نقطه مورد نظر مقدار خوراک به خوبی مشخص شده است.

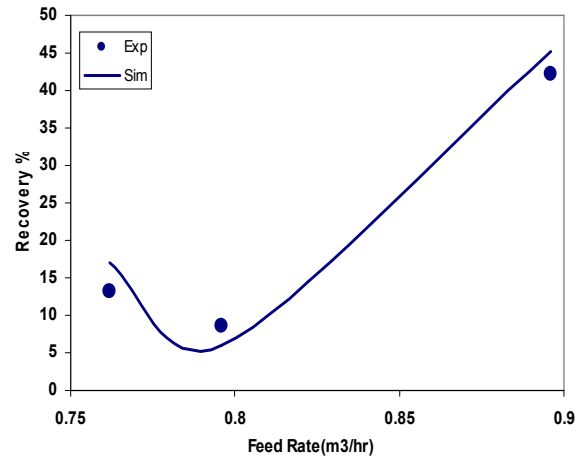
در شکل (۸) تأثیر فشار بر روی عملکرد فرایند در سیکل ۳۰۰ ثانیه‌ای نشان داده شده است. همانگونه که انتظار می‌رود افزایش فشار در این فرایند تأثیر مثبت بر روی درصد خلوص محصول دارد و البته این افزایش فشار مستلزم افزایش انرژی مصرفی در فرایند خواهد بود.



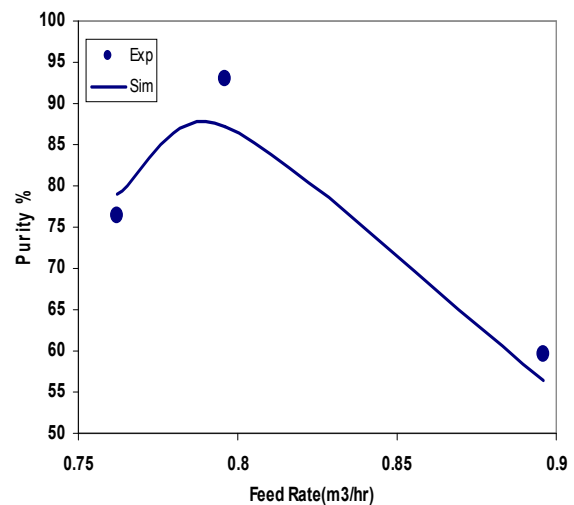
شکل (۸): تغییرات درصد خلوص محصول بر حسب فشار در یک سیکل ۳۰۰ ثانیه‌ای

در شکل (۹) مقایسه نتایج آزمایشها با شبیه سازی فرایند برای تغییرات درصد خلوص بر حسب میزان درصد بازیابی محصول در دو سیکل ۲۰۰ و ۴۰۰ ثانیه‌ای صورت گرفته است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود افزایش درصد خلوص موجب کاهش میزان درصد بازیابی محصول در هر دو سیکل می‌شود. از طرفی این شکل نشان می‌دهد. سیکل ۲۰۰ ثانیه‌ای از کارایی بالاتری برخوردار است چون برای یک درصد خلوص معین میزان درصد بازیابی محصول بیشتر است.

خلوص در مقدار جریان زدایش ثابت بر حسب مقدار جریان خوراک رسم شده است. در هر دو شکل نتایج آزمایشها با شبیه سازی فرایند مقایسه شده است.



شکل (۶): تغییرات میزان بازیابی بر حسب مقدار جریان خوراک در فشار ۲/۵ بار و سیکل ۲۰۰ ثانیه‌ای

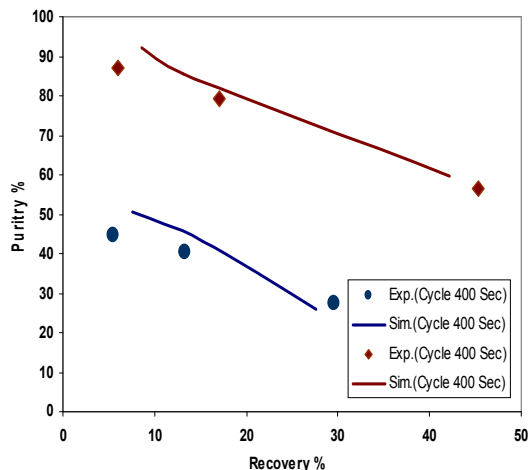


شکل (۷): تغییرات درصد خلوص بر حسب مقدار جریان خوراک در فشار ۲/۵ بار و سیکل ۲۰۰ ثانیه‌ای

در فرآیندهای PSA همواره بین درصد خلوص و مقدار خوراک یک نقطه بیشینه وجود دارد که در آن نقطه، بر اساس مقدار خوراک، درصد خلوص محصول مقدار

ضمائم

- b_i : ثابت ایزوترم لانگمویر برای جزء i (cm^3/mol)
 C_i : غلظت جزء i در فاز گاز (mol/cm^3)
 C_i : غلظت کل در داخل بستر (mol/cm^3)
 D_i : ضریب پراکندگی محوری (cm^2/sec)
 k_i : ضریب انتقال جرم کلی برای جزء i (sec^{-1})
 L : طول بستر (m)
 V : سرعت جریان گاز داخل بستر (cm/sec)
 t : زمان (sec)
 q_i : غلظت جزء i در فاز جامد (mol/cm^3)
 q_i^* : غلظت جزء i در فاز جامد در حال تعادل با فاز گاز (mol/cm^3)
 q_{is} : غلظت اشباع جزء i در فاز جامد (mol/cm^3)
 Z : فاصله از نقطه ورودی بستر (cm)
 \mathcal{E} : ضریب تخلخل بستر



شکل (۹): میزان درصد خلوص بر حسب درصد بازیابی در فشار ۲/۵ بار برای سیکلهای ۲۰۰ و ۴۰۰ ثانیه‌ای

۷- نتیجه گیری

در این کار یک پایلوت PSA دارای چهار بستر جذب برای جدا کردن اکسیژن از هوا مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند مرکب از مراحل جذب، یکسان سازی به فشار پایین، تخلیه، زدایش، یکسان سازی به فشار بالا، فشارزنی با محصول و فشارزنی با خوراک در نظر گرفته شد. آزمایشها به صورتی ترتیب داده شدند که اثر پارامترهایی چون زمان سیکل، فشار مرحله جذب، مقدار جریان خوراک و زدایش روی عملکرد سیستم بررسی شوند. مدلسازی و شبیه سازی فرآیند نیز با استفاده از روش با هم گذاری متعامد و نرم افزار MATLAB صورت گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی در مقایسه با نتایج تجربی مطابقت خوبی را نشان داده است. آزمایشهای انجام شده مؤید این است که افزایش فشار در این فرایند تا فشار ۴/۵ بار اثر مثبتی بر افزایش خلوص سیستم دارد. همچنین در بین سیکلهای انتخاب شده ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ ثانیه ای از نظر میزان خلوص بدست آمده و میزان بازیابی، سیکل ۲۰۰ ثانیه ای از قابلیت بالاتری برخوردار است. نتایج نشان داد که برای سیکل ۲۰۰ ثانیه ای در صورتیکه میزان زدایش ثابت بماند یک مقدار بیشینه میزان خلوص برای خوراک ورودی وجود خواهد داشت.

مراجع

- [1] R.T. Yang, "Gas Separation by Adsorption Processes", Butterworth Publishers, (1987).
 [2] M. Suzuki, "Adsorption Engineering", John Wiley & Sons, Inc., (1989).
 [3] D.M. Rutven, "Principles of Adsorption & Adsorption Processes", John Wiley & Sons, Inc., (1984).
 [4] Ch.T. Chou, W.Ch. Huang, "Simulation of a Four-Bed Pressure Swing Adsorption Process for Oxygen Enrichment", Ind. Eng. Chem. Res. 33, (1994).
 [5] A.M.M. Mendes, C.A.V. Costa, A.E. Rodrigues, "Oxygen Separation from Air by PSA: Modelling and Experimental Results, Part I: Isothermal Operation", Separation and Purification Technology, 24 (2001) 173-188.
 [6] J.G. Jee, M.B. Kim, Ch.H. Lee, "Pressure Swing Adsorption Processes to Purify Oxygen Using a Carbon Molecular Sieve", Chem. Eng. Sci., 60(2005) 869-882.
 [7] J. C. Santos, P. Cruz, T. Regala, F. D. Magalhaes, A. Mendes, "High-Purity Oxygen Production by Pressure Swing Adsorption" Ind. Eng. Chem. Res., 46 (2007) 591-599.
 [8] Xu. Jin, A. Malek, S. Farooq, "Production of Argon from an Oxygen-Argon Mixture by Pressure Swing Adsorption" Ind. Eng. Chem. Res. 45 (2006) 5775-5787.

Adsorption Oxygen Unit ", Chem. Eng. Sci., 44, 12 (1989) 2809-2816.

[12] J.G .Jee, H.J. Park, S.J. Haam, Ch.H. Lee, "Effects of Nonisobaric and Isobaric Steps on O₂ Pressure Swing Adsorption for an Aerator ", Ind. Eng. Chem. Res, 41 (2002) 4383-4392.

[13] B.A. Finlayson, "Nonlinear Analysis in Chemical Engineering", MC.Graw Hill, New York, (1980).

[9] A.S.T. Chiang, Y.L. Chung, Ch.W. Cheng, T.H.Hung, T.Y.Lee, "Exprimental Study on a Four-Bed PSA Air Separation Process", AICHE.J, 40 (1994)12.

[10] N. S. Raghavan, D. M. Ruthven, " Pressure Swing Adsorption Part III: Numerical Simulation of a Kinetically Controlled Bulk Gas Separation ", AICHE.J, 31, 12 (1985) 2017-2025.

[11] S. Farooq, D.M.Ruthven, H.A. Boniface, "Numerical Simulation of a Pressure Swing

Oxygen Separation from Air Using Pressure Swing Adsorption

L. Fathi, J. Towfighi

Chemical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, IRAN

M. Mofarahi

Chemical Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, IRAN

ARTICLE INFO

Article history :

Received 11 August 2008

Received in revised from 8 October 2008

Accepted 4 December 2008

Keywords:

Pressure Swing Adsorption (PSA)

Oxygen Separation

Zeolite 5A.

ABSTRACT

Pressure swing adsorption is an important unit for gas separation and purification. In order to develop the PSA technology, a pilot plant including four beds each with 1 meter length and 3.5 cm ID was designed and built. This pilot includes control systems and analysis systems to investigate the various operational conditions of beds carefully. In order to test this pilot, separation of oxygen from air, using zeolite 5A type adsorbants, was studied. In this process the steps of feed pressurization, production, blowdown, purge, pressure equalization (two steps) and product pressurization are included in a cycle. The effects of pressure, cycle time, flow rate of feed and purge on gas purity and recovery were studied. Also modeling and simulation of this process was done by orthogonal collocation method and MATLAB software. The numerical results obtained from modeling were compared to the experimental results and gave reasonable agreements.

All rights reserved.