

طراحی روشی جهت کاهش نقطه‌ی شبنم هوای ابزار دقیق

خشک

یوسف زینالیⁱ، فتح‌الله فرهادیⁱⁱ

چکیده

واحدهای هوای ابزار دقیق با استفاده از فرایندهای متداول در جذب سطحی، نظیر فرایندهای فشارجارویی و دما جارویی، رطوبت موجود در جریان هوا را حذف کرده و هوایی با مشخصات نقطه شبنم پایین برای استفاده در تجهیزات کنترلی و آنالیزورها تولید می‌کند.

در این مقاله، ستون‌های جذب سطحی واحد هوای ابزار دقیق فاز ۱ پارس جنوبی که از فرایند فشارجارویی برای تولید هوای خشک استفاده می‌کنند شبیه‌سازی شده و عملکرد آن‌ها بررسی شده‌است. مشخصه نقطه شبنم ستون‌های طراحی شده، -20°C است. برای رسیدن به نقطه شبنم پایین‌تر از -70°C که مورد نیاز واحد است، استفاده از ستونی با دولایه جاذب متفاوت پیشنهاد و رفتار چرخه جذب ستون پیشنهادی شبیه‌سازی شده‌است. بر اساس این پیشنهاد، طراحی بستری با دو لایه آلومینا و زئولیت به‌خوبی می‌تواند چنین نیازی را برآورده سازد.

کلمات کلیدی

هوای ابزار دقیق، جذب سطحی، فرایند فشارجارویی، شبیه‌سازی چرخه جذب، نقطه شبنم.

Design a Method to Reduce the Instrument Air Dew Point

Yousef Zeinaly, Fatollah Farhadi

ABSTRACT

Instrument air plants produce dry air with low dew point using different adsorption processes such as PSA and TSA. This air is utilized in analyzers and control devices.

In this study, the instrument air plant of South Pars Phase 1 is simulated and its performance is evaluated. Design specification of these columns is to produce dry air with dew point of -20°C . To achieve lower desired dew points of -70°C , a two layer beds is suggested and simulated. A column with two different adsorbent of Alumina and Zeolite is simulated and its performance is evaluated.

KEYWORDS

Instrument air, 2- Adsorption, 3- Pressure swing adsorption, 4- Adsorption cycle simulation, 5- Dew point.

شده‌است. این واحد دارای دو کمپرسور اسکرو، دو ستون

جذب و فیلترهایی قبل و بعد از ستون‌ها می‌باشد. هوای

متراکم پس از عبور از فیلترها وارد ستون‌های جذب شده و

رطوبت خود را از دست می‌دهد.

۱- مقدمه

واحد تولید هوای ابزار دقیق فاز یک مجتمع پالایشگاهی پارس جنوبی توسط شرکت AirPack طراحی و ساخته

ⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، Email: yousef.zeinaly@yahoo.com

ⁱⁱ دانشیار دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، Email: fatfarhadi@yahoo.com

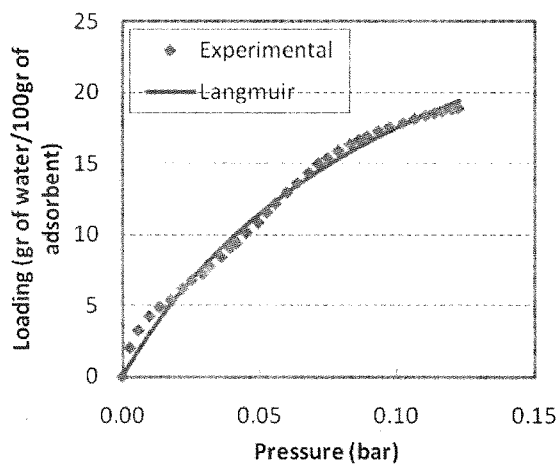
اعمال تغییرات در ستون‌ها از یکی از ماژول‌های بسته نرم‌افزاری ASPEN به نام ADSIM استفاده و خروجی این شبیه‌ساز بعنوان نتایج گزارش شده، است.

۲- شبیه‌سازی

ایزوترم جذب و داده‌های سینتیکی، مهم‌ترین داده‌های مورد نیاز در مدل کردن هر فرایند جذبی می‌باشد. داده‌های مربوط به ایزوترم جذب به‌ندرت در منابع منتشر شده و داده‌های موجود برای شرایط خاص و جاذب‌های مخصوص می‌باشد. اطلاعات ترموفیزیکی و مشخصات جاذب از دیگر داده‌های مورد نیاز در روند بررسی دقیق فرایند جذب می‌باشد.

۲-۱- ایزوترم جذب

مطابق اطلاعات سازنده، جاذب مورد استفاده در ستون‌های جذب از جنس آلومینا F1 می‌باشد. برای به‌دست آوردن ایزوترم جذب این جاذب، از داده‌های تجربی گزارش شده در مراجع استفاده شده است [۲]. این داده‌ها بر حسب رطوبت نسبی در دامنه‌ی دمایی (۲۵-۵۰°C) ارائه شده‌اند. با محاسبه فشار بخار آب در دمای ۵۰°C و اعمال آن در داده‌های تجربی گزارش شده، پارامترهای مدل لانگمویر [۴] برازش شده و تطابق این مدل در پیش‌بینی جذب با داده‌های گزارش شده مقایسه گردید، (شکل (۱)).



شکل (۱): برازش داده‌های تجربی با مدل لانگمویر در دمای ۵۰°C

پارامترهای نتیجه از برازش داده‌های تجربی با مدل ایزوترم لانگمویر، در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): پارامترهای مدل لانگمویر برازش شده با داده‌های

تجربی

پارامتر	$q_s b$ (gr/100gr.bar)	b (1/bar)	r^2
مقدار	۳۲۹/۵۹۸	۸/۸۰۴	۰/۹۹

ستون‌ها از مقدار مناسبی جاذب آلومینا F1 پر شده‌اند تا دمای نقطه شبنم هوای خروجی را به ۲۰°C- کاهش دهند. دو ستون به صورت الکنگی و مطابق فرایند فشارجاروبی [۳] کار می‌کنند، یعنی درحالی‌که یکی از بسترها در فشار بالا در حال جذب است، بستر دیگر در فشاری پایین‌تر، فرایند احیا را طی می‌کند. طول زمان یک چرخه‌ی جذب ۱۰ دقیقه است. جذب طی ۵ دقیقه و احیا در مدت ۴ دقیقه انجام می‌گیرد و در مدت ۱ دقیقه فشار ستون‌ها بین دو مرحله‌ی جذب و دفع تنظیم می‌شود. به بیان دقیق‌تر، پس از پایان فرایند جذب، فشار بستر از ۱۰/vbar به حدود ۱/۵bar کاهش می‌یابد و در این فشار به مدت ۴ دقیقه احیا می‌شود. پس از پایان فرایند احیا و آماده شدن بستر برای جذب، فشار ستون دوباره به ۱۰/vbar افزایش می‌یابد. افزایش فشار با استفاده از جریان هوای خشک شده صورت می‌گیرد و ستون دوباره فرایند جذب را به مدت ۵ دقیقه طی می‌کند. جریان هوا در طول جذب از بالا به پایین و در طول احیا از پایین به بالا می‌باشد. برای احیا از هوای خشک شده بعنوان بخشی از محصول جذب، استفاده می‌شود و جریان خروجی از بستر در حال احیا به محیط تخلیه می‌شود. جدول (۱) اطلاعات طراحی ستون‌های جذب را نشان می‌دهد.

جدول (۱): اطلاعات طراحی ستون‌های جذب

۱/۲m	قطر
۲/۶m	ارتفاع
۱۶۰۰ kg	جرم جاذب در بستر
۵۰°C	دمای جریان ورودی
۱۰/vbara	فشار عملیاتی جذب
۵۷۶۰ Nm ³ /hr	دبی هوای مرطوب جذب
۱/۵bara	فشار عملیاتی احیا
۵۶۷ Nm ³ /hr	دبی هوای خشک احیا

برای استفاده از آنالیزورها با توجه به حساسیت این دستگاه‌ها، هوای خشک با نقطه‌ی شبنمی در حدود ۷۰°C- مورد نیاز است. در حال حاضر به جای هوای مورد استفاده در آنالیزورها از نیتروژن تولیدی در واحد نیتروژن استفاده می‌شود.

هدف این مقاله بررسی قابلیت ستون‌های موجود برای تولید هوای خشک با نقطه شبنم ۷۰°C- و در صورت نیاز تغییر در آن‌ها برای رسیدن به هوای خشک با مشخصه مورد نیاز است. برای این منظور ستون‌های جذب شبیه‌سازی شده و قابلیت آنها با نیاز پالایشگاه جهت هوای خشک آنالیزورها مورد تطبیق قرار گرفته است.

برای بررسی چرخه جذب واحد موجود و نتایج حاصل از

$$D_k = 9700 r_p \sqrt{T/M} \quad (5)$$

D_k : ضریب نفوذ نودسن، cm^2/s

r_p : شعاع حفره، cm

T : دما، K

M : جرم مولکولی، gr/mole

نفوذ نودسن هنگامی مهم می‌شود که تعداد برخورد بین ذره و حفره بیش‌تر از برخورد بین ذرات نفوذکننده باشد. یعنی قطر حفره کوچک‌تر از مسیر پویش آزاد باشد. چون مسیر پویش آزاد، تابع معکوس از فشار است، با کاهش فشار مکانیزم نفوذ به تدریج از نفوذ مولکولی به نفوذ نودسن تغییر می‌کند. باید دقت داشت که فشاری که در آن رژیم نفوذ تغییر می‌کند تابع قطر حفره است. در فشار محیط، نفوذ نودسن در حفره‌هایی با قطر کمتر از 10 nm رخ می‌دهد. در ناحیه میانی که برای اکثر جاذب‌های صنعتی صادق است، هر دو مکانیزم نفوذ موثر است. تاثیر تلفیق نفوذ نودسن و نفوذ مولکولی با رابطه‌ی معکوس ۶ تخمین زده می‌شود [۴]:

$$\frac{1}{D_p} = \frac{\tau}{\varepsilon_p} \left(\frac{1}{D_k} + \frac{1}{D_m} \right) \quad (6)$$

τ ضریب انحنا است و برای اکثر جاذب‌های صنعتی به‌عنوان حدس اولیه می‌توان مقدار ۳ را در نظر گرفت [۴].

۳- نفوذ ریزحفره: در حفره‌های خیلی کوچک که اندازه قطر حفره به‌ندرت اندکی بزرگ‌تر از اندازه ذرات است، ذرات از میدان نیروی سطح نمی‌توانند فرار کنند. تحت چنین شرایط اثرات شکل فضایی و ناهمگون در توزیع میدان نیرو مهم می‌شوند و نفوذ نودسن دیگر مطرح نیست، نفوذ توسط مکانیزم حرکت و جهش از یک سایت به سایت دیگر صورت می‌پذیرد و نفوذ تابع دما و غلظت است. شکل کلی رابطه ۷، برای ضریب نفوذ ریزحفره‌ای پیشنهاد شده است [۴]:

$$D_c = D_{\infty} e^{-E/RT} \quad (7)$$

که E انرژی اکتیواسیون یا انرژی لازم برای حرکت از یک سایت به سایت مجاور است.

برای محاسبه ضریب کلی انتقال جرم (MTC^4) که تلفیق اثر سه مقاومت ذکر شده را در برابر انتقال جرم نشان می‌دهد، از رابطه ۸ استفاده شده است [۲]:

$$\frac{1}{MTC} = \frac{R}{3k_f} + \frac{R^2}{15\varepsilon_p D_p} + \frac{r_p^2}{15KD_c} \quad (8)$$

\bar{K} ثابت هنری بدون بعد است. مقدار جمله سوم با توجه به مقدار صورت کسر که توان دوم شعاع حفره است، ناچیز

در برابر انتقال جرم از فاز گاز به سطح جاذب، سه نوع مقاومت وجود دارد:

۱- مقاومت فیلم خارجی: ذره معلق و قرارگرفته در سیال توسط لایه‌ای از سیال که لایه مرزی آرام است احاطه شده و جزء جذب‌شونده یا دفع‌شونده باید از میان این فیلم نفوذ کند. ضخامت این لایه و در نتیجه مقاومت در برابر انتقال جرم، تابعی از شرایط هیدرودینامیک سیستم است. تغییرات ضریب انتقال جرم با شرایط هیدرودینامیکی توسط روابط تجربی و به شکل کلی طبق رابطه ۳ ارائه می‌شود.

$$sh = \frac{2k_f R}{D_m} = f(Re, Sc) \quad (3)$$

که Re و Sc به ترتیب اعداد رینولدز و اشمیت هستند که بر مبنای ابعاد ذرات جاذب تعریف و محاسبه شده‌اند. یکی از روابط تجربی که بطور گسترده استفاده می‌شود و برای سیستم‌های گاز و مایعات جواب‌های قابل قبول می‌دهد، رابطه ۴ است [۵]:

$$sh = \frac{2k_f R}{D_m} = 2 + 1.1 Sc^{1/3} Re^{0.6} \quad (4)$$

R شعاع ذره و D_m ضریب نفوذ مولکولی است. برای محاسبه ضریب نفوذ مولکولی روابط متعدد کاربردی و نیمه تجربی و داده‌های تجربی در مراجع ارائه و گزارش شده است [۶].

۲- نفوذ درشت‌حفره: پدیده انتقال در درشت‌حفره‌ها به چند مکانیزم مختلف صورت می‌گیرد که می‌توان آن را به صورت نفوذ توده‌ای مولکول، نفوذ نودسن^۲، نفوذ سطحی، و جریان پوازوی^۲ دسته‌بندی کرد.

در سیستم‌های مایع، نفوذ توده مولکولی معمولاً عامل تعیین‌کننده بوده ولی در سیستم‌های بخار، نفوذ سطحی و نودسن تاثیرگذار است و اهمیت بیشتری دارد. آنجا که گرادیان فشار در سیستم‌ها پایین است، جریان پوازوی که به علت گرادیان فشار صورت می‌گیرد چندان مهم نیست و تاثیری ندارد.

مولکولی که به دیواره حفره برخورد می‌کند مسیر برگشت قابل پیش‌بینی ندارد و هیچ رابطه‌ای بین زاویه برخورد مولکول به دیوار و زاویه برگشت آن وجود ندارد. این رفتار منجر به مکانیزم نفوذ نودسن می‌شود. شار جریان در نفوذ نودسن متناسب با گرادیان غلظت یا فشار جزئی است و با رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۴].

است و می‌توان از آن در برابر دو جمله‌ی دیگر چشم‌پوشی کرد. پس رابطه ۸ به رابطه ۹ تبدیل می‌شود.

$$\frac{1}{MTC} = \frac{R}{3k_f} + \frac{R^2}{15\epsilon_p D_p} \quad (9)$$

۳-۲- شبیه‌سازی بستر آلومینا F1

برای بررسی عملکرد و قابلیت ستون موجود در واحد تولید هوای ابزار دقیق، بستری از جاذب به وزن ۱۶۰۰ kg که تحت فرایند PSA به صورت متناوب دوره جذب و احیا را طی می‌کند، شبیه‌سازی شده‌است.

فرضیاتی که برای شبیه‌سازی سیستم در شبیه‌ساز ADSIM به کار رفته، عبارتند از:

۱- خوراک ورودی فقط شامل هوا و آب منظور شده و از سایر مواد موجود در هوا چشم‌پوشی شده‌است. در ضمن هوا به صورت یک ماده تک‌جزئی معرفی شده‌است.
 ۲- فرایند جذب تک‌جزئی در نظر گرفته شده‌است و از جذب اجزای هوا چشم‌پوشی شده‌است، یعنی "جذب"، تنها درباره جذب آب در نظر گرفته شده‌است.

۳- با توجه به ضریب تراکم‌پذیری هوای ورودی در شرایط عملیاتی به میزان ۰/۹۹۵، برای پیش‌بینی رفتار جریان خوراک از قانون گاز ایده‌آل استفاده شده‌است.

۴- بستر، یک‌بعدی و در جهت محور مدل شده‌است. این فرض با توجه به دبی بالای خوراک و جریان در بستر آکنه، منطقی می‌باشد. برای مدل کردن، محور طولی به ۲۰ نقطه تقسیم شده‌است.

۵- از افت فشار در طول بستر صرف‌نظر و فشار بستر ثابت فرض شده‌است.

۶- با توجه به فرض ثابت بودن فشار و پایین بودن میزان رطوبت در خوراک، تغییرات سرعت در اثر جذب اندک می‌باشد که در نتیجه سرعت نیز ثابت فرض می‌شود.

۷- برای مدل سینتیکی فرض‌های الف تا ج لحاظ شده‌اند: الف- انتقال جرم بر اساس فیلم جامد بیان می‌شود.

ب- برای بیان رابطه‌ی انتقال جرم از فرم خطی استفاده می‌شود.

ج- ضریب انتقال جرم به صورت کلی و ثابت فرض شده‌است.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = MTC(q^* - q) \quad (10)$$

MTC: ضریب انتقال جرم کلی، 1/s

q^* : بارگیری جاذب در تعادل با سیال با غلظت C^* ، Kmol/kg of adsorbate/kg of adsorbent

q : بارگیری در جاذب، Kmol of adsorbate/kg of

adsorbent

۸- ضریب انتقال جرم در فرایند دفع با مقدار ضریب انتقال جرم در فرایند جذب مساوی فرض شده‌است.

۹- از مدل جذب لانگ‌مویر برای پیش‌بینی جذب استفاده شده‌است.

$$q = \frac{q_s bP}{1 + bP} \quad (11)$$

۱۰- سیستم، هم‌دما فرض شده‌است که با توجه به طبیعت فرایندهای PSA و زمان کوتاه عملیات، منطقی است [۲].

۱۱- از هوای کاملاً خشک برای احیا استفاده شده‌است.

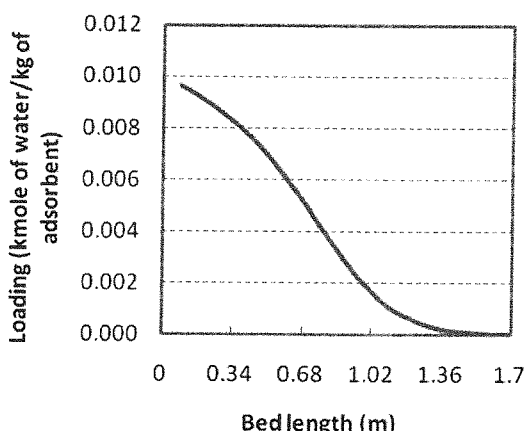
عملیات برای شبیه‌سازی فرایند مطابق با بدترین شرایط در نظر گرفته شده‌است. دمای هوای ورودی به ستون برابر با بیشینه دمای مجاز طراحی، ۵۰°C، فرض شده و هوا در این دما و در فشار عملیاتی ۱۰/Vbar اشباع از آب در نظر گرفته شده‌است. به بیان دیگر، رطوبت نسبی هوای ورودی به بستر جذب در شرایط عملیاتی ۱۰۰٪ می‌باشد. این اطلاعات و سایر اطلاعات فیزیکی جاذب Alumina F1 در جدول (۳) ارائه شده‌است [۶].

جدول (۳): مشخصات و شرایط عملیاتی بستر شبیه‌سازی شده

مشخصات بستر	
طول، H_b	۱/Vm
قطر، D_b	۲m
تخلخل بستر، ϵ_b	۰/۲۵
مشخصات جاذب	
چگالی، ρ	۸۳۳kg/m ³
شعاع دانه‌های جاذب، R	۰/۰۰۲m
قطر متوسط حفره، r_p	۹nm
تخلخل درون جاذب، ϵ_p	۰/۵۲
ضریب انتقال جرم، MTC	۱/۸۸×۱۰ ^{-۴} 1/s
شرایط عملیاتی جذب	
دبی هوا	۰/۰۷۳۱۸Kmol/s
دما، T	۳۲۳/۱۵K
فشار، P	۱۰/Vbar
جزء مولی بخار آب	۰/۰۱۱۳۰۷
جزء مولی هوا	۰/۹۸۸۶۹۳
شرایط عملیاتی احیا	
دبی هوا	۰/۰۰۷۰۲۷Kmol/s
دما، T	۳۲۳/۱۵K
فشار، P	۱/۵bar
جزء مولی بخار آب	۰
جزء مولی هوا	۱

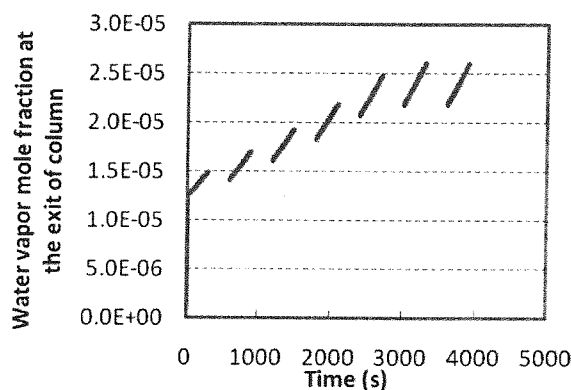
سیستم شبیه‌سازی شده بطور دقیق مانند ستون واقعی عمل می‌کند. بستر جذب ابتدا به مدت ۵ دقیقه در فشار ۱۰/Vbar فرایند جذب را پشت سر می‌گذارد، به دنبال این مرحله، شیر ورودی خوراک بسته می‌شود ولی شیر خروجی همچنان باز

شبنم هوای فراوری شده به مقدار مورد نظر در طراحی در یک سوم انتهایی بستر صورت می گیرد.



شکل (۳): شارژ باقیمانده در بستر پس از عملیات احیا در مرحله هفتم

با ثبات پروفایل شارژ باقیمانده در بستر، پروفایل تغییرات جزءمولی بخار آب در هوای خشک خروجی نیز در چرخه های متوالی جذب ثابت می ماند. این حالت، پایدار شدن عملکرد چرخه جذب نامیده می شود. شکل (۴) تغییرات جزءمولی بخار آب در هوای خروجی از بستر جذب در چرخه های متوالی را نشان می دهد که پس از ۶ چرخه به حالت پایدار رسیده است. عملکرد سیستم فرایندی PSA پس از این به صورت یکنواخت می باشد و پروفایل تغییرات جزءمولی بخار آب در هوای خشک خروجی از بستر ثابت می ماند.

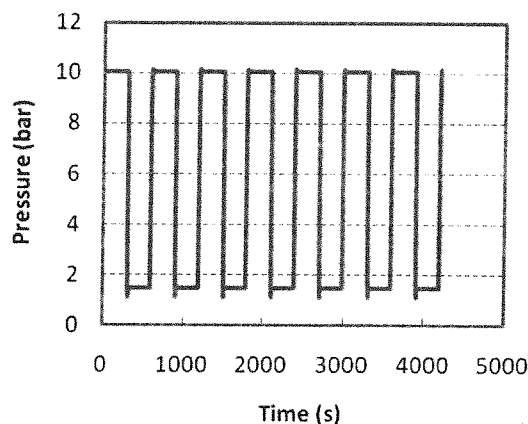


شکل (۴): تغییرات جزءمولی آب در هوای خروجی از ستون در چرخه های جذب متوالی تا رسیدن به حالت پایدار

جزءمولی بخار آب در پایان مرحله ی جذب چرخه هفتم برابر با $2/6 \times 10^{-6}$ است. نقطه شبنم متناظر با این مقدار از بخار آب در هوا تقریباً برابر با -34°C می باشد. جدول (۴) جزءمولی بخار آب و دمای شبنم متناظر را در پایان مراحل جذب تا رسیدن به حالت پایدار نشان می دهد.

است و هوای باقیمانده در بستر را به بیرون تخلیه می کند تا فشار را تا ۱/۵bar کاهش دهد. در این فشار مرحله احیا آغاز می شود. جریان احیا عکس جریان جذب است، یعنی جذب از بالا به پایین در طول بستر انجام می شود ولی در هنگام احیا جهت جریان عکس می شود و جریان هوای احیا کننده از پایین به بالاست. این روش باعث می شود که رطوبت جذب شده از چرخه قبل (شارژ باقیمانده) در انتهای خروجی بستر (بر اساس جهت جریان در هنگام جذب) کمتر شود و در نتیجه خلوص محصول بدست آمده در جذب چرخه بعدی بیشتر خواهد بود. بستر پس از احیا و تنظیم فشار با محصول و رسیدن به فشار ۱۰/۷bar دوباره وارد مرحله جذب و چرخه بعدی می شود. شکل (۲) تغییرات فشار در بستر را به هنگام چرخه های متوالی نشان می دهد.

پس از احیا، همچنان مقداری از بخار آب جذب شده در مرحله جذب قبلی، در بستر باقی می ماند و بخشی از ظرفیت بستر برای جذب بخار آب از جریان هوای ورودی در دسترس نخواهد بود و همین مساله باعث افزایش تدریجی جزءمولی آب و در نتیجه افزایش نقطه شبنم هوای خشک تولیدی در چرخه بعدی می شود.



شکل (۲): تغییرات فشار در بستر در چرخه های متوالی جذب

حالت های متفاوتی برای ترتیب جریان های جذب و احیا وجود دارد و هر ترتیبی مشخصه شارژ باقیمانده خود را در بستر باقی می گذارد [۳]. شکل (۳) شارژ باقیمانده پس از مرحله احیا در چرخه هفتم را نشان می دهد. از ویژگی های چرخه های PSA، بار عملیاتی کم و شارژ باقیمانده بالا می باشد [۳]. در شکل (۳) به وضوح پدیده است که شارژ باقیمانده در بستر بسیار بالاست و در عمل ظرفیت عملیاتی جاذب برای جذب بخار آب از جریان هوا پایین است. شرایط عملیاتی و شرایط بستر به گونه ای است که جداسازی توده ای بخار آب در دو سوم ابتدایی بستر انجام می گیرد و خالص سازی و رساندن نقطه

جدول (۴): جزء مولی بخار آب و نقطه شبنم متناظر با آن در لحظه پایانی ۷ مرحله و رسیدن به حالت پایدار

شماره سیکل	جزء مولی بخار آب	نقطه شبنم °C
۱	$1/51 \times 10^{-5}$	-۴۰
۲	$1/71 \times 10^{-5}$	-۳۸
۳	$1/94 \times 10^{-5}$	-۳۷
۴	$2/20 \times 10^{-5}$	-۳۶
۵	$2/48 \times 10^{-5}$	-۳۵
۶	$2/60 \times 10^{-5}$	-۳۴
۷	$2/61 \times 10^{-5}$	-۳۴

نیاز پالایشگاه به هوایی با نقطه شبنم پایین‌تر با توجه به طراحی برج جذب مورد استفاده، برطرف نمی‌شود. جزء مولی متناظر با نقطه شبنم 70°C - برابر با $3/28 \times 10^{-7}$ است. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده، این مقدار تنها در چند ثانیه آغاز نخستین چرخه جذب قابل دستیابی است و در چرخه‌های بعدی با وجود شارژ باقیمانده در بستر دیگر در لحظات نخستین نیز بدست نمی‌آید. هرچند که در صنعت چرخه‌های با زمان عملکرد پایین متداول است ولی طراحی بستر مورد مطالعه و ماهیت جذب مورد استفاده به‌گونه‌ای است که در این مورد چنین امکانی وجود ندارد.

داده‌های گزارش شده از نقطه شبنم هوای خروجی از ستون‌های خشک‌کن در جدول (۵) آمده است. این داده‌ها در شرایط متفاوت از شرایط شبیه‌سازی بدست آمده‌اند ولی همگی در محدوده‌ای نزدیک و زیر 20°C - می‌باشند.

جدول (۵): داده‌های عملیاتی از نقطه شبنم خروجی از خشک‌کن در تاریخ ۸۶/۰۶/۰۴

ساعت اندازه‌گیری	نقطه شبنم (°C)	دمای هوای ورودی (°C)
۲:۰۰pm	-۳۱/۱	۴۲
۴:۰۰pm	-۳۱/۸	۴۲
۶:۰۰pm	-۳۲/۲	۴۲
۸:۰۰pm	-۳۱	۴۲
۱۰:۰۰pm	-۳۸/۸	۴۴
۱۲:۰۰pm	-۳۷	۴۴

۴-۲- اصلاح فرایند

نتایج بدست آمده در بخش [۲-۳] نشان می‌دهد که دستیابی به نقطه شبنم 70°C - با ستون‌های موجود در واحد عملیاتی امکان‌پذیر نیست و برای رسیدن به چنین نقطه شبنمی در خروجی ستون باید تغییراتی در واحد ایجاد کرد. چندین

راه حل می‌توان برای اصلاح واحد ارائه کرد:

- ۱- می‌توان از جداسازی آبخاری استفاده کرد به این معنی که بستر دیگری به train اضافه کرد تا هوایی که در بسترهای قبلی نقطه شبنم آن تا 20°C - کاهش یافته است با فراوری بیشتر به درجه خلوص بالاتری برسد.
- ۲- افزایش مقدار جاذب مورد استفاده در ستون‌ها با توجه به ثابت بودن حجم ستون، استفاده از ستون‌های بلندتر و با حجم بیشتر پیشنهاد می‌گردد.
- ۳- تغییر جاذب مورد استفاده در ستون.

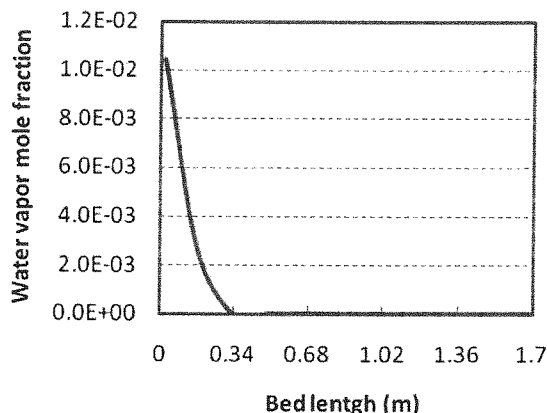
راه حل ۱ و ۲ مستلزم تغییرات ساختاری در واحد است که چندان مطلوب نیست. بنابراین استفاده از راه حل سوم رویکرد مناسبی برای حل این مساله است. برای دستیابی به نقاط شبنم پایین‌تر، بهترین جاذب‌ها زئولیت‌ها هستند [۳]. زئولیت 4A معمولترین جاذب مورد استفاده در خشک‌کن‌های صنعتی است. جذب بخار آب بر روی این جاذب شدید است، از سوی دیگر با توجه به فلسفه فرایند PSA بایستی از جاذبی استفاده کرد که ایزوترم جذب نسبتاً ضعیفی داشته باشد تا به راحتی در فشار پایین‌تر احیا شود [۲]. بنابراین استفاده از جاذب زئولیت چندان مناسب نیست. به نظر می‌رسد راه حل بهتری می‌توان پیشنهاد کرد:

- ۴- استفاده از دو نوع جاذب در بستر.

می‌توان بخشی از جاذب آلومینا F1 در انتهای بستر را با جاذب زئولیت 4A جایگزین کرد (حالتی بین راه حل ۱ و ۳). بدین ترتیب جداسازی توده‌ای در ابتدای بستر و با آلومینا F1 انجام می‌شود و پس از کاهش جزء مولی بخار آب در انتهای این لایه، جداسازی بیشتر در انتهای بستر بر روی جاذب زئولیت 4A انجام می‌شود. به عبارت دیگر هوایی که با عبور از روی جاذب آلومینا درصد بیشتری از رطوبت خود را از دست داده، وارد بستر زئولیت می‌شود و به نقاط شبنم پایین‌تری می‌رسد. در این حالت بارگیری جاذب زئولیت کم است و به خوبی احیا خواهد شد.

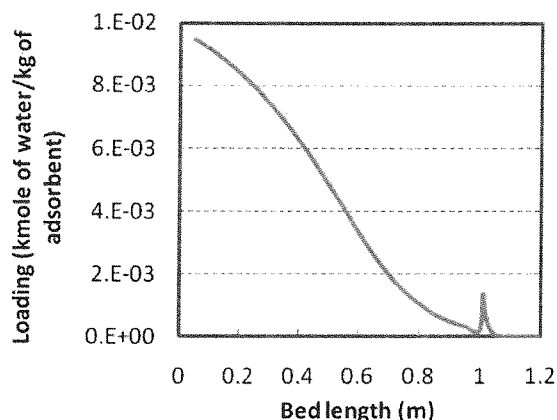
برای بدست آوردن میزان زئولیت 4A که باید جایگزین بخشی از جاذب آلومینا F1 شود، ابتدا جذب بر روی بستر زئولیت 4A مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

برای شبیه‌سازی فرایند جذب، نخستین داده مورد نیاز ایزوترم جذب است. شکل (۵) داده‌های تعادلی جذب بخار آب بر روی زئولیت 4A را در مقایسه با مدل لانگمویر برازش شده با این داده‌ها نشان می‌دهد [۲] و پارامترهای بدست آمده از برازش داده‌های تجربی با مدل ایزوترم لانگمویر در جدول (۶) ارائه شده است.



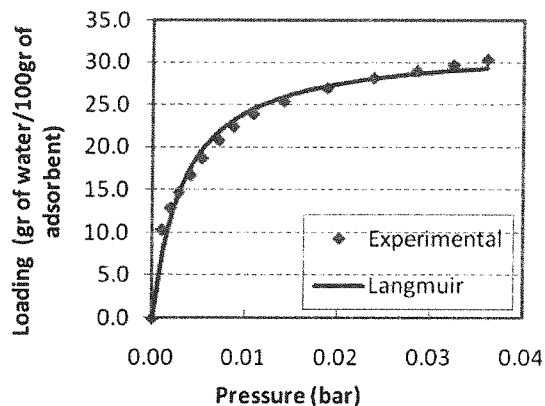
شکل (۶): پروفایل جزءمولی بخار آب در طول بستر جذب زئولیت 4A در زمان ۳۰۰s

شکل (۷) شارژ باقیمانده در بستر پس از پایان احیای مرحله هفتم را نشان می‌دهد. شارژ باقیمانده در بستر میزان بالایی دارد که مطابق با ویژگی‌های فرایند PSA است. در پایان لایه آلومینا و شروع لایه زئولیت، افزایشی در بارگیری رخ می‌دهد که علت آن، طبیعت جاذب زئولیت است. ایزوترم جذب زئولیت 4A به گونه‌ای است که در فشار جزئی پایین نیز میزان بارگیری بالایی دارد.



شکل (۷): شارژ باقیمانده در بستر دو لایه پس از عملیات احیا در مرحله هشتم

در پایان این مرحله جزءمولی بخار آب $4/85 \times 10^{-11}$ می‌باشد و نقطه شبنم آن به مراتب کمتر از -70°C است (شکل (۸)). ستون پس از ۸ مرحله به حالت پایدار می‌رسد. جزءمولی بخار آب در پایان هرکدام از ۸ مرحله در جدول (۸) آمده‌است.



شکل (۵): مدل لانگمویر در پیش‌بینی جذب با داده‌های تجربی در دمای 50°C [۲]

جدول (۶): پارامترهای مدل لانگمویر، برازش شده با داده‌های تجربی

پارامتر	$q_s b$ (gr/100gr.bar)	b (1/bar)	r^2
مقدار	۹۷۳۱/۶۸۸	۳۰۴/۹۱۲	۰/۹۹

فرض‌هایی که در شبیه‌سازی فرایند جذب بر روی جاذب زئولیت 4A به کار رفته‌اند مطابق با فرض‌های استفاده شده در بخش [۲-۳] هستند. مشخصات جاذب زئولیت 4A [۶] و بستر شبیه‌سازی شده در جدول (۷) ارائه شده‌است.

جدول (۷): مشخصات بستر و جاذب

مشخصات جاذب و بستر	
640 kg/m^3	چگالی، ρ
0.02 m	شعاع دانه‌های جاذب، R
0.4 mm	قطر متوسط حفره، r_p
0.35	تخلخل بستر، ϵ_p
0.32	تخلخل درون جاذب، ϵ_p
$2/48 \times 10^{-3} \text{ 1/s}$	ضریب انتقال جرم، MTC

پروفایل غلظت بخار آب در طول بستر در لحظه ۳۰۰s نشان می‌دهد در بستری به طول ۲۴cm جزءمولی در خروجی بستر به زیر مقدار مورد نظر جهت دستیابی به نقطه شبنم -70°C می‌رسد (شکل (۶)). در این نقطه از بستر جزءمولی بخار آب در حدود $5/2 \times 10^{-8}$ است که از مقدار متناظر با نقطه شبنم -70°C یک مرتبه بزرگی، کوچکتر می‌باشد. بنابراین به عنوان یک گزینه‌ی اولیه برای ابعاد ستون دو لایه‌ای، طول لایه‌ی آلومینا FI یک متر و طول لایه‌ی زئولیت 4A برابر 0.2 m انتخاب می‌شود، یعنی طول بستر از $1/7 \text{ m}$ به $1/2 \text{ m}$ کاهش می‌یابد. هوای مرطوب ورودی به ستون ابتدا در تماس با جاذب آلومینا FI بخش اعظم رطوبت خود را از دست می‌دهد و در ادامه بستر و در روی زئولیت 4A به درجه‌های بالاتر جداسازی می‌رسد.

بستر جذب با دو لایه جانب متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و چرخه جذب مطابق با مشخصات جدید شبیه‌سازی شد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده آنست که روش بستر دولایه‌ای با کمترین هزینه در واحد که شامل جایگزینی بخشی از جاذب آلومینا FI با جاذب زئولیت 4A است، تولید هوای خشک با نقطه شبنم -70°C را امکان‌پذیر می‌سازد.

ع- ضمیمه

برای مدل‌سازی فرایند جذب، بایستی موازنه‌های جرم و انرژی و مومنتوم برای المان کوچکی از سیستم نوشته شوند. با نوشتن این موازنه‌ها، معادله‌های دیفرانسیلی به دست می‌آید که باید با استفاده از تکنیک‌های حل عددی به صورت همزمان حل شوند.

برای بستر استوانه‌ای، با فرض یکنواخت بودن توزیع غلظت و بارگیری در راستای محور شعاعی، معادلات دیفرانسیلی جرم و انرژی به صورت روابط ۱۲ تا ۱۷ خواهند بود:

۱- معادله دیفرانسیلی موازنه جرم [۱]:

$$-D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + v \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial C}{\partial t} + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

با شرایط مرزی:

$$\begin{cases} B.C.1: D_L \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} = -v(C_{inlet} - C|_{z=0}) \\ B.C.2: D_L \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

و شرایط اولیه:

$$C(z,0) = f(z) \quad (14)$$

که D_L ضریب پراکنندگی محوری و v سرعت در جهت محور z است.

۲- معادله دیفرانسیلی موازنه انرژی [۱]:

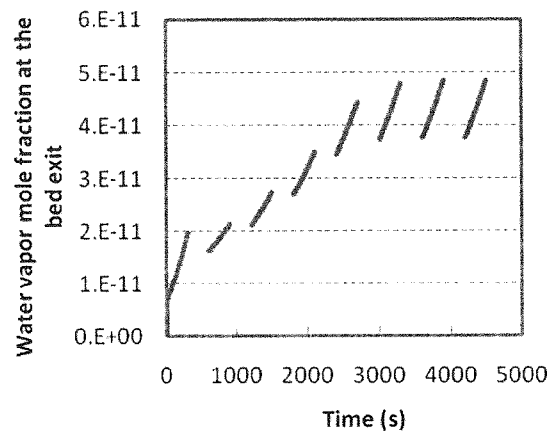
$$-K_L \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + v \rho_g c_g \frac{\partial T}{\partial z} + \left(\rho_g c_g + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho_s c_s \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) (-\Delta H_{ads}) \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

با شرایط مرزی:

$$\begin{cases} B.C.1: K_L \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = -v \rho_g c_g (T_{inlet} - T|_{z=0}) \\ B.C.2: K_L \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

و شرایط اولیه:

$$T(z,0) = g(z) \quad (17)$$



شکل (۸): تغییرات جزءمولی آب در هوای خروجی از ستون بستر دولایه در چرخه‌های جذب متوالی تا رسیدن به حالت پایدار

جدول (۸): جزءمولی بخار آب و نقطه شبنم متناظر با آن در لحظه پایانی ۸ مرحله و رسیدن به حالت پایدار

شماره سیکل	جزءمولی بخار آب	نقطه شبنم $^{\circ}\text{C}$
۱	$1/97 \times 10^{-11}$	کمتر از -70
۲	$2/13 \times 10^{-11}$	کمتر از -70
۳	$2/74 \times 10^{-11}$	کمتر از -70
۴	$3/49 \times 10^{-11}$	کمتر از -70
۵	$4/44 \times 10^{-11}$	کمتر از -70
۶	$4/80 \times 10^{-11}$	کمتر از -70
۷	$4/84 \times 10^{-11}$	کمتر از -70
۸	$4/85 \times 10^{-11}$	کمتر از -70

۳- بحث و نتیجه‌گیری

برای بررسی عملکرد سیستم طراحی شده توسط شرکت AirPack، ستون جذبی با مشخصات و جزئیات فرایندی جذب PSA توسط نرم‌افزار ADSIM (از ماژول‌های ASPEN) شبیه‌سازی شد. مطالعه چرخه جذب ستون‌های سیستم هوای ابزار دقیق و بررسی نتایج نشان داد که طراحی این سیستم برای تولید پایای هوای خشک با نقطه شبنم کمتر از -20°C مناسب است.

استفاده از ستون‌های طراحی شده برای تولید هوایی با نقطه شبنم -70°C امکان‌پذیر نمی‌باشد و در هیچ زمانی از مرحله جذب، جزءمولی بخار آب در هوای خروجی به میزان متناظر با نقطه شبنم -70°C نمی‌رسد.

برای تولید هوایی با این مشخصات، بایستی تغییراتی در خشک‌کن‌ها صورت گیرد. از میان گزینه‌های متفاوت، استفاده از

که K_L ضریب موثر هدایت حرارتی محوری، ΔH_{ads} گرمای جذب، و ρ_s ، c_s ، ρ_g و c_g خواص فیزیکی جاذب و سیال است.

برای موازنه مومنتوم در فاز گاز می‌توان از روابط نیمه‌تجربی محاسبه افت فشار نظیر معادله Ergun و یا Karman-Kozeny استفاده کرد [۱].

۵- مراجع

- [۱] Aspen Engineering Suite 11.1, "Aspen ADSIM User Manual", 2001.
- [۲] Auerbach, Scott M.; Carrado, Kathleen A. and Dutta, Prabir K, "Handbook of Zeolite Science and Technology", 1st Edition, Marcel Decker Inc., 2003.
- [۳] Douglas M. Ruthven, "Encyclopedia of Separation Technology; A Kirk Othmer Encyclopedia", 1st Edition, V1, John Wiley & Sons, 1997.
- [۴] Doung D. Do, "Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics", 1st Edition, V2, Imperial College Press, 1998.
- [۵] N. S. Raghavan and D. M. Ruthven, "Dynamic Behavior of an Adsorption Column-II", Chemical Engineering Science, Vol 39, p.p. 877-884, 1984.
- [۶] Perry, Robert H. and Green, Don W., "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 7th Edition, McGraw Hill, 1999.

۶- زیر نویس ها

Pressure Swing Adsorption (PSA)¹
Knudsen²
Poiseulle³
Mass Transfer Coefficient⁴