اولین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع
ایران، تهران، خرداد 1388
Archive of SID

بررسی کارایی و راندمان سیستم سرمایش دسیکنت مایع و امکان‌سنجی آن در ایران

سپهر صنایع[1]، شهرام صدقی[2]، فرهنگ وهابی[3]

آزمایشگاه بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی- دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه علم و صنعت ایران
[1]دانشیار؛ sepehr@iust.ac.ir
[2]دانشجوی کارشناسی ارشد؛ sh.sedghii@gmail.com
[3]کارشناس ارشد؛ farhang.vahabi@gmail.com

چکیده

آثار زیانبار ناشی از کاربرد کلروفلوروکربن‌ها که بطور وسیعی در سیستم‌های رایج مثل کمپرس بخار و صنایع تهویه هوا استفاده می‌شود بر محیط زیست تاکنون اثبات شده است. بنابراین این صنایع در صدد استفاده از تکنولوژی‌های نوین هستند. یکی از این تکنولوژی‌ها که در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات وسیعی در مورد آن در حال انجام است، سیستم‌های سرمایش دسیکنت می‌باشد.

در این تحقیق از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای فشرده استفاده شده است، به طوری که قادر است بصورت همزمان هم رطوبت و هم دمای هوای ورودی مبدل را کاهش دهد، شایان ذکر است که در سیستم ارائه شده، از محلول دسیکنت (لیتیم کلراید) استفاده گردیده و از انرژی هوای بازگشتی (هوای ثانویه) برای پائین آوردن دمای هوای ورودی (هوای اولیه) استفاده شده است. (با توجه به اینکه هوای بازگشتی رطوبت و دمای کمتری از هوای محیط (هوای اولیه) دارد، لذا این عمل موجب می‌شود تا راندمان سرمایش تبخیری بالا رود). همچنین در ادامه با بررسی امکان‌سنجی سیستم سرمایش دسیکنت مایع در ایران، مناطقی از کشور را که در آن مناطق استفاده از این سیستم‌ها جذاب است، شناسایی کرده‌ایم.

کلمات کلیدی: دسیکنت مایع، مبدل حرارتی صفحه‌ای، بازیافت انرژی، راندمان.

مقدمه

در واحدهای معمول تهویه مطبوع، هوای خنک و رطوبت‌زدایی شده به طور همزمان از طریق انتقال حرارت بین هوای موجود و سطح تبخیر کننده حاصل می‌شود. به هر حال کنترل میزان رطوبت‌زدایی تحت این وضعیت و تأمین شرایط آسایش ضعیف خواهد بود. با توجه به تحقیقات انجام شده بهترین گزینه برای جایگزینی روش مذکور، استفاده از روش رطوبت‌زدایی دسیکنت می‌باشد[1]. خوشبختانه تکنولوژی رطوبت‌زدایی بر اساس جاذب‌های دسیکنت یک روش موثری را برای افزایش کنترل رطوبت‌زدایی و تأمین شرایط آسایش محیط از طریق حرارت اتلافی مصرف شده و یا حرارت حاصل از انرژی خورشیدی در تابستان پیشنهاد می‌دهد[2]. کاربرد مواد جاذب رطوبت یا دسیکنت‌ها در سیستم‌های سرمایش، موجب حذف رطوبت در هوای ورودی به سیستم سرمایش می‌شود. حذف رطوبت باعث می‌شود که سیستم سرمایش با راندمان مطلوب‌تری عمل کند. حتی به وسیله این تکنیک می‌توان روش سردسازی تبخیری را در مناطق مرطوب توسعه داد که این یکی از بهترین ویژگی‌های سیستم سرمایش دسیکنت می‌باشد[3]. انواع متفاوت از ماده دسیکنت و روش‌های گوناگون برای مصرف آن موجود می‌باشد که هریک دارای مزایا و معایبی است. در حال حاضر دسیکنت مایع به علت انرژی کمی که برای بازیافت[1] لازم دارد، بیشتر مورد توجه می‌باشد زیرا می‌توان انرژی مورد نیاز برای بازیافت را از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین نمود.

در مقاله حاضر به بررسی عملکرد سیستم سرمایش دسیکنت مایع و مدلسازی و بررسی رفتار مبدل حرارتی مورد نظر در مقابل تغییر پارامترها و تعیین امکان‌سنجی این سیستم در ایران پرداخته شده است، و در نهایت با یک برآورد هزینه مقایسه‌ای بین هزینه واحد سوخت مصرفی (گاز طبیعی) که در بازیاب سیستم سرمایش دسیکنت مورد استفاده قرار می‌گیرد و هزینه واحد انرژی برق مصرفی که در پمپ‌ها و فن‌های سیستم‌های سرمایش متداول مصرف می‌گردد، شده است که کاهش هزینه و مصرف سوخت قابل ملاحضه‌ای را نشان می‌دهد.

ساختار سیستم

یکی از روش‌های کاربرد دسیکنت مایع استفاده از دسیکنت مایع به همراه سرمایش تبخیری غیرمستقیم بصورت همزمان می‌باشد. برای رسیدن به چنین هدفی از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای[2] بصورتی که در شکل (1) نشان داده شده است، استفاده شده است.

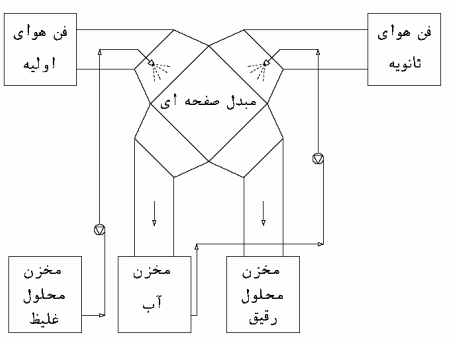
سیستم مورد نظر ما، شامل یک مبدل حرارتی صفحه‌ای فشرده می‌باشد که با توجه به مسئله خوردگی، صفحات آن از جنس پلاستیک است، همچنین سیستم مورد نظر شامل دو عدد فن، یکی برای تخلیه هوای ثانویه و دیگری برای ورود هوای اولیه به مبدل و دو عدد پمپ برای تأمین فشار لازم برای اسپری کردن آب و محلول دسیکنت می‌باشد. جریان هوای اولیه (هوای تازه که از فضای خارج وارد می‌شود) توسط اسپری شدن محلول دسیکنت بر روی آن، و جریان هوای ثانویه (هوای بازگشتی از فضای تهویه شده) بوسیله

1. Regenerate
2. Plate Heat Exchanger

www.SID.ir

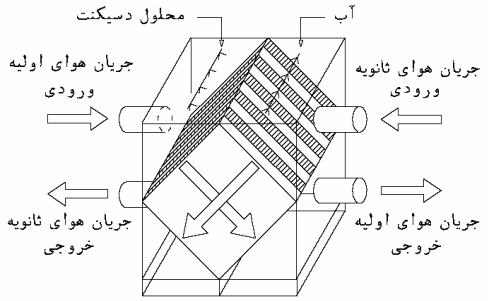
Archive of SID

اسپری شدن آب، خنک می‌شوند. جریان‌های مجاور هم بوسیله صفحات نازکی از جنس پلیمر از هم جدا شده‌اند.



شکل 1: نمایی دو بعدی از اجزای مبدل حرارتی صفحه‌ای مورد بررسی در این تحقیق

مزیت این سیستم در این است، که بصورت همزمان هم رطوبت و هم دمای هوای ورودی مبدل را کاهش می‌دهد، با توجه به اینکه هوای بازگشتی دارای رطوبت و دمای کمتری از هوای محیط (هوای اولیه) است (شکل 2)، جریان هوای ثانویه همانند یک چاه حرارتی عمل نموده و مقداری از انرژی حرارتی هوای اولیه را جذب می‌نماید که این عمل موجب می‌شود تا راندمان سرمایش تبخیری بالا رود. همچنین محلول دسیکنت پاشیده شده، باعث کاهش رطوبت وآلودگی‌های هوای اولیه می‌گردد. در نتیجه هوای خروجی از مبدل حاوی رطوبت و دمای کمتری نسبت به محیط می‌باشد.

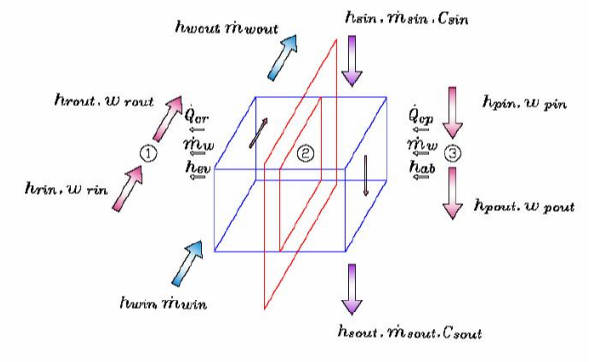


شکل 2: نمای شماتیک مبدل حرارتی مورد استفاده در سیستم سرمایش مورد نظر در این تحقیق

مدلسازی و تعیین راندمان مبدل

جهت تعیین پارامترهای خروجی مبدل، باید مدل ترمودینامیکی مبدل مشخص گردد، بدین منظور یکی از صفحات مبدل به همراه دو جریان مجاور به آن مورد بررسی قرار داده شده است.

برای مدلسازی مطابق شکل (3)، سه حجم کنترل در نظر می‌گیریم: 1- هوای ثانویه، 2- جریان آب / صفحه جدا کننده / جریان محلول و 3- هوای اولیه. معادلات (1) تا (3) به ترتیب بیانگر معادلات بقای انرژی و معادلات (4) تا (6) به ترتیب بیانگر معادلات بقای جرم برای سه حجم کنترل مذکور می‌باشند.



شکل 3: نمای شماتیک از یکی از صفحات مبدل مورد نظر و سه حجم کنترل در نظر گرفته شده در آن

$$C_{P,a}(T_{r,out}-T_{r,in}) + C_{P,g}(T_{r,out}w_{r,out}-T_{r,in}w_{r,in})+(\Delta w_r)h_v = \frac{h_{c,r}A}{\dot{m}_r}(\bar{T}_w-\bar{T}_r)+C_{P,g}\Delta w_r T_{w,in}+\Delta w_r h_v \quad (1)$$

$$C_{P,w}[(1+\frac{\Delta\dot{m}_w}{\dot{m}_w})T_{w,out}-T_{w,in}] + C_{P,S}[(1+\frac{\Delta\dot{m}_s}{\dot{m}_s})T_{s,out}-T_{s,in}] = \frac{h_{c,p}A}{\dot{m}_p}(\bar{T}_p-\bar{T}_s)+C_{P,g}\Delta w_p T_{p,in}+\Delta w_r(h_v+\Delta h_d) - \frac{h_{c,r}A}{\dot{m}_r}(\bar{T}_w-\bar{T}_r)-C_{P,g}\Delta w_r T_{w,in}+\Delta w_r h_v \quad (2)$$

$$C_{P,a}(T_{p,in}-T_{p,out}) + C_{P,g}(T_{p,in}w_{p,in}-T_{p,out}w_{p,out})+(\Delta w_p)h_v = \frac{h_{c,p}A}{\dot{m}_p}(\bar{T}_p-\bar{T}_s)+C_{P,g}\Delta w_p T_{p,in} + \Delta w_p(h_v+\Delta h_d) \quad (3)$$

$$\Delta w_r = \frac{\Delta\dot{m}_w}{\dot{m}_r} \quad (4)$$

$$\Delta\dot{m}_w+\Delta\dot{m}_s = \dot{m}_p\Delta w_p+\dot{m}_r\Delta w_r \quad (5)$$

$$\Delta w_p = \frac{\Delta\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (6)$$

پس از بدست آوردن مقادیر خروجی، حال می‌توان راندمان مبدل را بدست آورد، که دو نوع راندمان برای اینگونه مبدل‌ها تعریف می‌گردد، الف) راندمان رطوبت زدایی (e_d) و ب) راندمان کلی یا راندمان آنتالپی (e_h) که تحت تأثیر تغییرات رطوبت و دما می‌باشند.

$$e_d = \frac{w_{p,in}-w_{p,out}}{w_{p,in}-w_{p,out\,ideal}} \quad (7)$$

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن، $w_{p,out\,ideal}$ رطوبت مطلق ایده‌آل جریان هوای اولیه خروجی از مبدل می‌باشد. اگر فرض کنیم که هوا کاملاً رطوبت‌زدایی گردیده است، $w_{p,out\,ideal}$ را می‌توان صفر در نظر گرفت.

$$e_h = \frac{h_{p,in} - h_{p,out}}{h_{p,in} - h_{p,out\,ideal}} \quad (8)$$

$$h_{p,out\,ideal} = C_{P,a} T_{wb,r\,in} \quad (9)$$

بررسی تغییرات راندمان مبدل حرارتی مورد نظر در مقابل تغییر پارامترها

در این قسمت به بررسی رفتار مبدل مورد نظر در مقابل تغییر یکسری پارامترها و علت این تغییرات پرداخته شده است. مشخصات ظاهری مبدل مطابق جدول (1) می‌باشد.

جدول 1: مشخصات ظاهری مبدل مورد بررسی

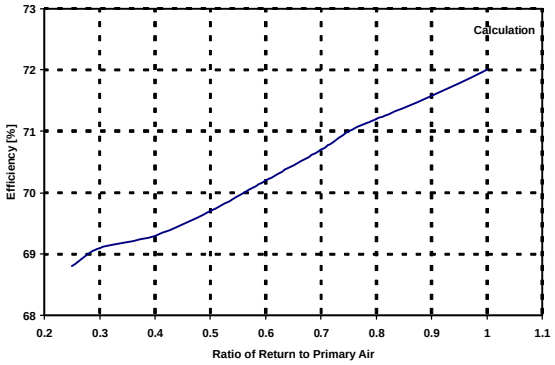
ابعاد	300*300*300
تعداد کانال‌ها	54*2
فاصله بین صفحات	2 mm
زاویه قرارگیری	45 درجه

مشخصات هوا، آب و محلول ورودی مطابق جدول (2) می‌باشد:

جدول2: مشخصات هوا، آب و محلول ورودی به مبدل مورد بررسی

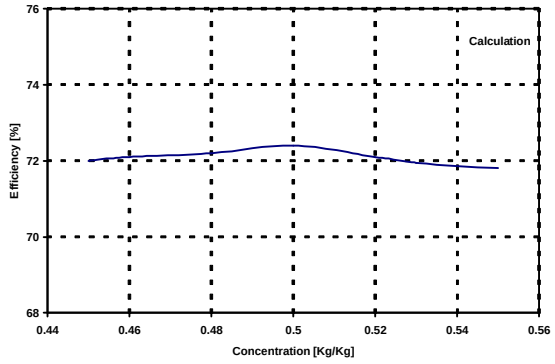
	دبی $[m^3/hr]$	دما $[^\circ C]$	رطوبت نسبی [%]
هوای اولیه	100-300	32	55-65
هوای ثانویه	100-300	30	40
آب	0/1	16	
محلول دسیکنت	0/1	35	

1) تأثیر $(\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_p})$ بر روی راندمان مبدل: همانطور که در شکل (4) دیده می‌شود، با افزایش $(\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_p})$ راندمان افزایش پیدا می‌کند، علت آن هم این است که هرچه $(\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_p})$ بیشتر شود و به عدد یک نزدیکتر گردد، دمای کارکرد محلول دسیکنت کاهش پیدا کرده و در نتیجه هم قدرت رطوبت‌زدایی آن افزوده می‌شود و هم در اثر تماسی که با هوای اولیه دارد، دمای هوای اولیه کاهش می‌یابد، در نتیجه بر راندمان مبدل افزوده می‌شود. البته این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که در مسائل واقعی، گاهی هوایی که از سیستم باید به محیط تخلیه شود کمتر از میزان هوای تازه‌ای است که برای تجدید هوا لازم است، بنابر این نسبت $(\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_p})$ معمولاً کمتر از یک می‌باشد.



شکل 4: تغییرات راندمان مبدل در مقابل تغییرات $(\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_p})$

2) تأثیر غلظت محلول دسیکنت ورودی بر روی راندمان مبدل: با افزایش $C_{s,in}$، پتانسیل رطوبت‌زدایی محلول دسیکنت افزایش می‌یابد، یا به عبارتی اختلاف فشار بخار موجود در سطح محلول دسیکنت با بخار موجود در هوای اولیه زیاد شده و در نتیجه محلول دسیکنت رطوبت بیشتری جذب می‌نماید. از طرفی این امر باعث بالا رفتن دمای کارکرد محلول دسیکنت می‌گردد که باعث می‌شود دمای حباب خشک هوای اولیه ورودی در اثر تماسی که با محلول دارد بالا رود، در نتیجه همان طور که در شکل (5) دیده می‌شود با افزایش غلظت محلول دسیکنت، ابتدا بازده افزایش و سپس به علت بالا رفتن دمای هوای اولیه، بازده کاهش می‌یابد.

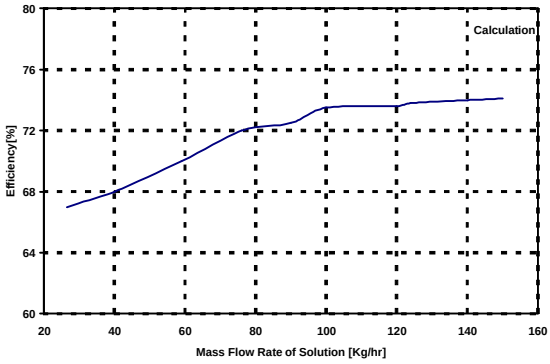


شکل 5: تغییرات راندمان مبدل در مقابل تغییرات $C_{s,in}$

3) تأثیر دبی جرمی محلول دسیکنت ورودی بر روی راندمان مبدل: با افزایش دبی جرمی محلول دسیکنت، بر میزان رطوبت‌زدایی افزوده می‌شود و در نتیجه با افزایش دمای هوای اولیه و کاهش رطوبت مواجه هستیم که در نتیجه راندمان مبدل نیز مطابق شکل (6) تغییر می‌کند.

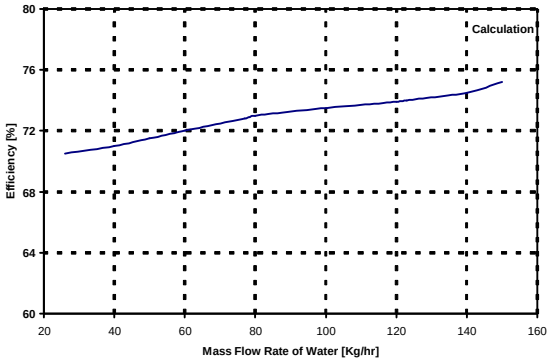
www.SID.ir

Archive of SID



شکل 6: تغییرات راندمان مبدل در مقابل تغییرات $\dot{m}_S$

4) تأثیر دبی جرمی آب ورودی بر روی راندمان مبدل: با افزایش دبی جرمی آب ورودی، ضریب نفوذ آب در هوا افزایش می‌یابد و رطوبت بیشتری وارد هوای ثانویه می‌گردد، در نتیجه جریان هوای ثانویه بار حرارتی بیشتری از هوای اولیه جذب می‌نماید. از طرفی با کاهش دمای کارکرد آب، دمای کارکرد محلول دسیکنت کاهش پیدا خواهد کرد و در نتیجه هم قدرت رطوبت‌زدایی آن افزایش می‌یابد و هم در اثر تماسی که با هوای اولیه دارد، دمای هوای اولیه کاهش می‌یابد، لذا طبق شکل (7) راندمان مبدل افزایش خواهد یافت.



شکل7: تغییرات راندمان مبدل در مقابل تغییرات $\dot{m}_W$

بررسی امکان‌سنجی سیستم سرمایش دسیکنت مایع در ایران

اصولاً امکان استفاده از سیستم‌های سرمایش دسیکنت با توجه به هزینه‌ای که به سیستم اعمال می‌نماید، باید بررسی شود و با سیستم‌های متداول مقایسه گردد. با وجود اینکه ارائه یک قانون کلی در مورد اقتصادی بودن این سیستم‌ها مشکل می‌باشد، اما کاربردهای خاصی وجود دارند که استفاده از این سیستم در آن‌ها بدیهی بوده و نیاز به بررسی دقیق ندارد (برای نمونه اتاق‌های عمل، سالن پاتیناژ و ...) و همچنین در مواردی که سیستم متداول (برای نمونه سیستم سرمایش تبرید تراکمی) پاسخگو نمی‌باشد، اضافه کردن این گونه سیستم‌ها به سیستم مورد نظر می‌تواند موثر واقع گردد ولی در سایر موارد باید پارامترهای خاصی را در نظر گرفت تا بتوان جذابیت استفاده از این گونه سیستم‌ها را مورد بررسی قرار داد. پارامترهای کلیدی مورد نظر از قرار زیر می‌باشند:

1- در دسترس بودن انرژی لازم برای بازیابی دسیکنت: یکی از مزایای دسیکنت مایع، انرژی پایین برای بازیابی می‌باشد که می‌توان این انرژی را در مواردی که منابع انرژی‌های فسیلی در دسترس نمی‌باشد، از منابع انرژی‌های تجدید پذیر، همانند انرژی خورشیدی تأمین نمود. در کشور ما از آنجایی که گاز طبیعی در اکثر نقاط کشور در دسترس می‌باشد و این نکته که مصرف برق در تابستان بصورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد، استفاده از گاز به عنوان منبع انرژی لازم برای بازیابی، می‌تواند گزینه مناسبی باشد.

2- قیمت برق و گاز منطقه مورد نظر: همان طور که در قسمت قبل گفته شد در فصل تابستان مصرف برق در پیک خود قرار دارد در حالی که مصرف گاز در حداقل مصرف قرار دارد، بنابراین سیستم دسیکنت می‌تواند روش مناسبی برای کاهش مصرف برق به خصوص در مناطقی که در تابستان از سیستم‌های متداول سرمایش (مانند سیستم سرمایش تراکمی) استفاده می‌نمایند، باشد. هزینه واحد انرژی برق مصرفی که در پمپ‌ها و فن‌ها مصرف می‌گردد با توجه به مقدار متوسط $289\ rial/kwh$ برای برق مصرفی [4] به صورت زیر است:

$$289\,rial/kwh \cdot 1\,rial/3412\,Btu = 0.0847\,rial/Btu \quad (11)$$

با فرض قیمت $1\$ = 10000\ rial$، عدد بالا بر حسب دلار برابر با $8.47\times10^{-6}\ \$/Btu$ می‌باشد. و هزینه واحد انرژی سوخت مصرفی (گاز طبیعی) که در بازیاب مورد استفاده قرار می‌گیرد با در نظر گرفتن مقدار متوسط $1000\ Btu/ft^3$ به عنوان ارزش حرارتی گاز طبیعی [5] در ایران و قیمت پایه $178\ rial/m^3$ برای گاز طبیعی، از قرار زیر است:

$$178\,rial/m^3 \cdot 1\,m^3/3.28^3\,ft^3 \cdot 1\,ft^3/1000Btu \quad (12)$$
$$= 0.00504\,rial/Btu$$

با فرض قیمت $1\$ = 10000\ rial$، عدد بالا بر حسب دلار برابر با $5.04\times10^{-7}\ \$/Btu$ می‌باشد.

با یک مقایسه ساده می توان به این نتیجه رسید که هزینه واحد انرژی سوخت مصرفی (گاز طبیعی) که در بازیاب مورد استفاده قرار می‌گیرد، تقریباً 90 درصد کمتر است از هزینه واحد انرژی برق مصرفی که در پمپ‌ها و فن‌ها مصرف می‌گردد.

3- شرایط تهویه مورد نیاز برای فضای داخل: استفاده از سیستم سرمایش دسیکنت در محیط‌هایی که T_{wb} در آن محیط به علت کاربری مورد نظر باید پایین باشد (مانند کارخانجات نساجی) و یا باید از سطح آلودگی پایینی برخوردار باشد (مانند اتاق عمل) جذاب و اقتصادی خواهد بود.

4- نسبت بار نهان به بار کل: در مورد نسبت بار نهان به بار کل باید گفت استفاده از سیستم‌های رطوبت‌زدا در مواقعی که نسبت بار نهان به بار کل هوای ورودی بالاتر از 25% باشد مقرون به صرفه بوده و در این حالت اصطلاحاً می‌گویند سیستم رطوبت‌زدا دارای جذابیت

www.SID.ir

Archive of SID

است[6]. با توجه به روابط مربوط به بار نهان و بار محسوس هوای تازه و شرط بالاتر از 25% بودن نسبت بار نهان به بار کل، نامعادله (13) بدست می‌آید و می‌توان مناطقی از کشور را که استفاده از این گونه سیستم‌ها در آن جذاب می‌باشد، تعیین نمود.

$$\frac{\Delta w}{\Delta T} \geq 0.397 \qquad (13)$$

نتایج

همانطور که نشان داده شد سیستم سرمایش دسیکنت بطور همزمان رطوبت و دمای هوای تازه را کاهش می‌دهد و راندمان بالاتری را نسبت به سیستم‌های سرمایش متداول فراهم می‌کند. همچنین با افزایش غلظت محلول دسیکنت و دبی جرمی محلول دسیکنت ورودی راندمان ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. (دارای یک پیک است) و با افزایش ($\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_p}$) و دبی جرمی آب، راندمان افزایش می‌یابد.

در ضمن همان طور که اشاره شد، کاربردهای خاصی وجود دارند که استفاده از این سیستم در آن‌ها بدیهی بوده و نیاز به بررسی دقیق ندارد، ولی در سایر موارد باید پارامترهای خاصی را در نظر گرفت تا بتوان جذابیت استفاده از این گونه سیستم‌ها را مورد بررسی قرار داد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

به عنوان یک نتیجه مهم می‌توان گفت، استفاده از سیستم‌های سرمایش دسیکنت در مناطقی از کشور که در آن نامعادله ($\frac{\Delta w}{\Delta T} \geq 0.397$) بر قرار است دارای جذابیت می‌باشد. همچنین به این نتیجه رسیدیم که هزینه واحد انرژی سوخت مصرفی (گاز طبیعی) که در بازیاب مورد استفاده قرار می‌گیرد، تقریباً 90 درصد کمتر است از هزینه واحد انرژی برق مصرفی که در پمپ‌ها و فن‌ها مصرف می‌گردد و لذا استفاده از سیستم سرمایش دسیکنت در کنار سیستم‌های سرمایش متداول (مانند سیستم سرمایش تراکمی) می‌تواند در صرفه جویی انرژی مفید واقع شود.

فهرست علائم

مساحت صفحات، m^2	A
گرمای ویژه، $J/Kg.K$	C_P
غلظت محلول، %	C_s
راندمان رطوبت زدایی، %	e_d
راندمان کلی یا راندمان آنتالپی، %	e_h
آنتالپی، J/Kg	h
گرمای نهان تبخیر، J/Kg	h_h
آنتالپی رقیق سازی، J/Kg	Δh_d
ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W/m^2.K$	h_c
دبی جرمی، Kg/s	$\dot{m}$
دما، $^\circ C$	T
دمای حباب تر، $^\circ C$	T_{wb}

علائم یونانی

رطوبت مطلق هوا، Kg/Kg	w

زیرنویس

هوا	a
بخار آب	g
ورودی	in
خروجی	out
هوای اولیه	p
هوای ثانویه (هوای بازگشتی)	r
محلول دسیکنت	s
آب	w

مراجع

[1]- Zhen Li, Xiaohua Liu, Yi Jiang, and Xiaoyang Chen, ''New type of fresh air processor with liquid desiccant total heat recovery,'' Energy and Buildings, Vol. 37, pp. 587-593, 2005.

[2]- Ahmad A.Pesaran, Keith B.Wipke, ''Use of unglazed transpired solar collectors for desiccant cooling,'' Solar Energy, Vol. 52, pp. 419-427, 1994.

[3]- Akio Kodama, Weili Jin, Motonobu Goto, Tsutomu Hirose, and Michel Pons, ''Entropic analysis of adsorption open cycles for air conditioning,'' International Journal Energy Research, Vol. 24, pp. 263-278, 2000.

[4]- www.tavanir.org.ir

[5]- www.hesabiran.com

[6]- Ashrae Standard 69, *Ventilation for acceptable indoor air quality, 1*989.

www.SID.ir