دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

بررسی تجربی نقش استفاده از جاذب رطوبت در سیستم تهویه مطبوع جهت کاهش مصرف انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد پدیده‌های انتقال و فرآیندهای جداسازی

شیده خیامی

اساتید راهنما:

دکتر سید مصطفی نوعی باغبان

پروفسور سید حسین نوعی باغبان

۱۳۹۰

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی (پدیده‌های انتقال و فرآیندهای جداسازی)

خانم شیده خیامی

تحت عنوان

بررسی تجربی نقش استفاده از جاذب رطوبت در سیستم تهویه مطبوع جهت کاهش مصرف انرژی

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه	دکتر سید مصطفی نوعی باغبان
۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه	پرفسور سید حسین نوعی باغبان
۳- استد داور خارجی	دکتر محمد جواد مغربی
٤- استاد داور داخلی و نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر ناصر ثقه الاسلامی

مدیر گروه مهندسی شیمی **دکتر مهدی پور افشاری**

با تشکر از

شرکت بهینه سازی مصرف سوخت

که این پروژه را مشمول حمایت مالی خود قرار دادند.

اینجانب شیده خیامی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پایان نامه بررسی تجربی نقش استفاده از جاذب رطوبت در سیستم تهویه مطبوع جهت کاهش مصرف انرژی ، تحت راهنمایی آقایان دکتر سید مصطفی نوعی باغبان و دکتر سید حسین نوعی باغبان متعهد می شوم:

- **تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.**
- **در استفاده از نتایج محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.**
- **مطالب مندرج درپایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.**
- **کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه فردوسی مشهد ویا Ferdowsi University of Mashhad به چاپ خواهد رسید.**
- **حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.**
- **در کلیه مراحل این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.**

مالکیت نتایج و حق نشر

- **کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر گردد.**
- **استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.**

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۱
فصل اول: استفاده از جاذب ها در سیستم های تهویه مطبوع	۲
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- سیستم های رطوبت زدایی توسط جاذب	۵
۱-۳- تاریخچه ی جاذب ها	٦
۱-٤- فرآیند عملکرد جاذب ها	۷
۱-۵- معرفی سیستم های جاذب	۹
۱-۵-۱- مزایا	۹
۱-۵-۲- معایب	۹
۱-۵-۳- کاربردها	۱۰
۱-۵-٤- بهترین موارد کاربرد	۱۰
۱-۵-۵- کاربردهای ممکن	۱۱
۱-۵-٦- موارد اجتناب از به کارگیری جاذب ها	۱۲
۱-۵-۷- بازده	۱۲
۱-۵-۸- انواع فناوری های مرتبط	۱۳
۱-٦- کاربرد سیستمهای جاذب در تهویه مطبوع	۱٤
۱-۷- پارامترهای مؤثر بر عملکرد جاذب	۱٦
۱-۷-۱- ضریب عملکرد حرارتی	۱٦
۱-۷-۲- میزان بازده انرژی	۱۷
۱-۷-۳- ظرفیت ویژه ی سرمایش	۱۷
۱-۸- انواع سیستم‌های جاذب	۱۷
۱-۸-۱- سیستم‌های جاذب مایع	۱۷
۱-۸-۲- سیستم‌های جاذب جامد	۱۹
	۳۱
فصل دوم: آشنایی با مواد جاذب رطوبت	
۲-۱- انواع جاذب های رطوبت	۳۱
۲-۱-۱- گل مونت مورینولیت	۳۱
۲-۱-۲- سیلیکاژل	۳۲
۲-۱-۳- کلسیم اکسید	۳۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۲-۱-٤- کلسیم سولفات ۳۲
۲-۱-۵- زئولیت ۳۳
۲-۱-٦- سایر جاذب ها ٤۱
٤۲

فصل سوم: مروری بر پژوهش های انجام شده

۳-۱- بررسی و تحلیل عملکرد سیستم های تهویه مطبوع بر پایه ی جاذب ٤۲
۳-۲- توسعه، بهبود و بهینه سازی فناوری جاذب در سیستم های تهویه مطبوع ٤٦
۳-۳- بررسی جاذب ها و نحوه ی به کارگیری آن ها در سیستم های تهویه مطبوع ۵۳
۵۹

فصل چهارم: شرح دستگاه آزمایشگاهی و نحوه ی انجام آزمایش ها

٤-۱- شرح دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده ۵۹
٤-۲- نحوه ی عملکرد دستگاه ٦۱
٤-۲-۱- دمنده ٦۱
٤-۲-۲- گرمکن‌های الکتریکی ٦۲
٤-۲-۳- رطوبت ساز ٦۳
٤-۲-٤- مبدل های لوله‌گرمایی ٦۳
٤-۲-۵- فیلتر جاذب رطوبت ٦۷
٤-۲-٦- سیستم تبرید (کولرگازی) ۷۱
٤-۲-۷- سنسورها و نمایشگر دما و رطوبت ۷۳
٤-۲-۸- کانال‌های هوا ۷۳
٤-۲-۹- سرعت سنج ۷۵
٤-۳- نحوه ی انجام آزمایش‌ها ۷٦
۷۹

فصل پنجم: نتایج، بحث و بررسی

۵-۱- مقدمه ۷۹
۵-۲- نتایج ۸۰
۵-۲-۱- نتایج حاصل از بررسی انواع شرایط آب و هوای گرم و مرطوب ۸۰
۵-۲-۲- نتایج حاصل از بررسی اثر دبی ۸۱
۵-۳- تعریف پارامترهای ارزیابی عملکرد و نحوه ی انجام محاسبات ۸٤

۵-٤- بررسی نتایج ۸۸

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۵-٤-۱- بررسی انواع شرایط آب و هوای گرم و مرطوب ۸۸
۵-٤-۲- بررسی اثر دبی ۹۲
۵-٤-۳- مقایسه‌ی دو حالت برگزیده ۱۰۱
فصل ششم: جمع بندی و پیشنهادات ۱۰۲
٦-۱- نتیجه گیری ۱۰۲
٦-۲- پیشنهاداتی جهت ادامه ی کار ۱۰٤
منابع ۱۰۵

چکیده

امروزه مصرف انرژی به منظور تهویه مطبوع ساختمان‌ها رو به افزایش بوده و این امر صنعت تهویه مطبوع را با مسائل مختلفی از جمله نیاز بیشتر به افزایش کار آیی مصرف انرژی و بهبود کیفیت هوای فضای تهویه شونده، بالا رفتن قیمت مصرف برق در زمان اوج مصرف و ... مواجه می‌سازد.

روش‌های جدیدی برای برطرف کردن چنین مشکلات اقتصادی و محیطی در دست بررسی می‌باشند. در این میان، استفاده از سرمایش با جاذب‌ها و همچنین رطوبت زدایی به وسیله‌ی آن‌ها که گاه از آن به عنوان یک فناوری یاد می‌شود، در رفع بسیاری از این مشکلات، منافعی را متوجه ما ساخته است. از سوی دیگر استفاده از مبدل‌های لوله گرمایی به دلیل عدم وجود هر نوع تجهیزات با اجزاء متحرک و یا منبع اضافی نیرو جهت انتقال حرارت از چشمه حرارتی به حفره حرارتی گزینه‌ی دیگری از مهم‌ترین تجهیزات مورد استفاده جهت صرفه جویی در مصرف انرژی در سیستم‌های تهویه مطبوع به شمار می‌رود.

دستگاه مورد استفاده در این پژوهش، با هدف کاهش مصرف انرژی در سیستم تهویه مطبوع برای استفاده در مناطق با آب و هوای گرم و مرطوب طراحی و ساخته شده است. این دستگاه شامل دو مبدل لوله گرمایی دو ردیفه با آرایش مثلثی با سیال عامل متانول (که به صورت سری قرار گرفته‌اند)، فیلتر جاذب رطوبت (زئولیت سنتزی) و سیستم تبرید نوع اسپلیت می‌باشد.

آزمایش‌ها در دو بخش انجام شده است. در بخش اول به بررسی قابلیت کاربرد سیستم در انواع شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب و در بخش دوم به بررسی اثر دبی هوای ورودی بر عملکرد سیستم پرداخته شده است. در بخش اول چهار نوع شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب A (۳۵°C و۹۰ RH٪)، B (۴۰°C و ۸۰RH٪)، C (۴۵°C و۷۵ RH٪) و D (۵۰°C و۶۵ RH٪) مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در بخش دوم، جهت بررسی اثر دبی هوای ورودی سه نوع شرایط آب و هوایی A’ (۳۵°C و۹۰ RH٪)، B’ (۴۰°C و۷۵ RH٪) و C’ (۴۵°C و۷۰ RH٪) مورد بررسی قرار گرفت.

مقادیر نسبت صرفه جویی انرژی کلی حاصل شده برای ٤ حالت A تا D، از مقدار ۰,٤۰ تا ۰,۲۷ کاهش می‌یابد. علت این امر، بیشتر شدن بار حرارتی نهان هوای ورودی و همچنین بیشتر شدن گرمای جذب آزاد شده در اثر جذب بیشتر رطوبت می باشد، همچنین نسبت صرفه جویی انرژی حاصل شده توسط جاذب برای ٤ حالت A تا D، به دلیل بیشتر شدن نیرومحرکه‌ی جذب رطوبت، از ۰,۰۹ تا ۰,۲٤ افزایش می‌یابد. این پارامتر بیان کننده‌ی نقش کمکی جاذب در تأمین بار سرمایشی سیستم تبرید نسبت به حالت عدم استفاده از جاذب در سیستم است. همچنین استفاده از فیلتر جاذب در سیستم باعث بهبود عملکرد مبدل‌ها نسبت به حالت عدم استفاده از آن می‌شود؛ به طوری که مقادیر نسبت صرفه جویی انرژی مبدل‌ها در بخش‌های پیش‌سرمایش و بازگرمایش نسبت به حالت عدم استفاده از فیلتر جاذب بیشتر می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که سیستم مذکور دارای قابلیت کاربرد در انواع آب و هوای گرم و مرطوب بوده و در تمام شرایط مورد بررسی مقدار صرفه جویی انرژی قابل قبولی را ارائه می‌دهد؛ هرچند در شرایط (۴۰°C و ۸۰RH٪) و (۴۵°C و۷۵ RH٪) عملکرد مناسب‌تری داشته است. همچنین افزایش دبی هوای ورودی، اثر منفی بر عملکرد سیستم داشته و باعث کاهش میزان صرفه جویی انرژی در بخش‌های مختلف سیستم می‌شود.

کلمات کلیدی: سیستم تهویه مطبوع، اقلیم گرم و مرطوب، مبدل لوله گرمایی، فیلتر جاذب رطوبت، صرفه جویی انرژی.

فصل اول

استفاده از جاذب‌های رطوبت در سیستم‌های تهویه مطبوع

۱-۱ مقدمه

حفظ فضا یا محیط زندگی در دما و میزان رطوبت دلخواه احتیاج به فرآیندهایی به نام تهویه مطبوع دارد. سیستم‌های تهویه مطبوع شامل تهویه مطبوع صنعتی، تهویه مطبوع آزمایشگاهی، تهویه مطبوع در وسایل نقلیه، تهویه مطبوع در مناطق مسکونی و ... می‌باشد.

در تهویه مطبوع صنعتی، هدف ایجاد شرایطی است که باعث بهبود کیفیت محصولات تولیدی شود که این شرایط گاه منطبق با شرایط آسایش انسان بوده و گاه با شرایط آسایش انسان هم‌خوانی ندارد.

تهویه مطبوع در وسایل نقلیه نیز با هدف تأمین شرایط آسایش انسان است که ممکن است در وسایل نقلیه تهویه مطبوع کاملاً مناسب ممکن نباشد.

آسایش انسان به طور عمده به سه عامل بستگی دارد: دمای حباب خشک، رطوبت نسبی و سرعت هوا[۱و۲]. دمای محیط مهم‌ترین شاخص آسایش است و بیشتر مردم وقتی احساس آرامش می‌کنند که دمای محیط بین ^{o}C ۲۷-۲۲ باشد. همچنین اکثر افراد رطوبت نسبی بین ٤٠ تا ٦٠٪ را ترجیح داده و در سرعت هوای حدود m/min ۱۵ احساس خوبی دارند[۱].

به طور کلی فرآیندهای تهویه مطبوع بر حسب مورد، شامل گرمایش ساده (افزایش دما)، سرمایش ساده (کاهش دما)، رطوبت زنی (افزایش رطوبت) و رطوبت گیری (کاهش رطوبت) می‌باشد[۳].

از آن جا که سیستم تهویه مطبوع مورد استفاده در این پژوهش برای تهویه‌ی هوای گرم و مرطوب به کار گرفته شده است، لذا فرآیند تهویه در این جا تنها به سرمایش و رطوبت گیری محدود می‌شود.

اساساً سه روش جهت انجام عملیات رطوبت زدایی وجود دارد: رطوبت زدایی توسط متراکم کردن، رطوبت زدایی سرمایشی و رطوبت زدایی جذبی.

- متراکم کردن

متراکم کردن هوا، روشی جهت کاهش مقدار رطوبت هواست. با متراکم شدن هوا، فشار جزئی بخار آب در مخلوط گازی به نقطه‌ای افزایش پیدا می‌کند که در دمای بالاتر، رطوبت هوا می‌تواند میعان پیدا کند. این روش، گاهی اوقات برای حجم‌های بسیار کم هوا مناسب بوده اما هزینه‌ی تجهیزات متراکم سازی هوا، توان مورد نیاز و مقدار آب خنک کننده‌ی لازم جهت سرمایش بعدی، آن را برای حجم‌های بیشتر هوا غیر عملی می‌سازد.

- کاهش دمای هوا

روش دیگری که غالب جهت کاهش رطوبت هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاهش دمای هواست. با بررسی منحنی نقطه‌ی شبنم یا منحنی اشباع به تنهایی بر روی نمودار رطوبت سنجی، به راحتی می‌توان مشاهده نمود که با کاهش دمای هوا، مقدار رطوبتی که می‌تواند به همراه داشته باشد، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین، با سرد کردن هوا تا دمایی پایین‌تر از نقطه‌ی شبنم، رطوبت موجود در هوا می‌تواند مایع شده و بخشی از بخار به شکل مایع جدا شود، اما سرمایش در دمای بسیار پایین فرآیند سردسازی را غیر عملی می‌سازد، زیرا در این صورت نیازمند میزان زیادی از عملیات گرمایش مجدد در مرحله‌ی بعد می‌باشد. همچنین کاهش دمای هوا توسط نقطه‌ی انجماد آب میعان یافته بر روی کویل های سرمایشی نیز محدود

می‌شود که در برخی از طراحی‌ها، سعی بر آن است که توسط سیستم‌های پیچیده‌ی اسپری آب نمک و لیتیم کلراید مایع موجود، دمای انجماد کاهش داده شود، اما این سیستم‌ها بسیار سنگین بوده و شامل سیستم کنترلی پیچیده‌تری برای حفظ صحیح دانسیته ی محلول می‌باشند.

- استفاده از جاذب‌های رطوبت

جاذب‌ها موادی جامد یا مایع بوده که دارای خصوصیات استخراج یا نگه داری سایر موادی (معمولاً بخار آب) که در تماس با آن‌ها قرار دارند، می‌باشند. جاذب‌ها به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: جاذب‌ها و جاذب‌های سطحی.

- جاذب[1]

یک جاذب در حین فرآیند جذب به صورت فیزیکی، شیمیایی و یا به هر دو صورت دچار تغییر می‌شود. لیتیم کلراید، نمونه‌ای از یک جاذب جامد است. زمانی که آب روی این ماده جذب می‌شود، به فرم هیدراته تبدیل می‌شود.

در سیستم رطوبت زدایی جذبی مایع، هوا از درون اسپری جاذب مایع مانند لیتیم کلراید یا محلول گلایکول عبور می‌کند. جاذب در حالت فعال، فشار بخاری پایین‌تر از فشار بخار هوایی دارد که تحت رطوبت زدایی قرار می‌گیرد و رطوبت را از هوا جدا می‌کند. محلول جاذب در طول فرآیند جذب، با رطوبتی رقیق می‌شود که در طول فرآیند احیا که محلول تحت حرارت دهی قرار می‌گیرد، به جریان هوا داده می‌شود.

معمولاً جاذبی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، لیتیم کلراید بوده که یا به شکل مایع و یا به صورت کریستال‌های جامد در یک پوسته‌ی کندو مانند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- جاذب سطحی[2]

جاذب سطحی جاذبی است که در طول فرآیند جذب نه به صورت فیزیکی و نه شیمیایی تغییرنمی کند. جاذب‌های سطحی معمولاً به صورت دانه‌های گرانوله یا جامداتی با ساختار متخلخل هستند که آن‌ها را قادر می‌سازد که مقادیر زیادی آب را در سطح خود نگه داری کنند.

[1] absorbent
[2] adsorbent

مبنای رطوبت زدایی جذبی آن است که جاذب در معرض هوای مرطوب قرار گرفته، رطوبت از هوا جدا شده و در جاذب نگه داشته می‌شود. جاذب اشباع تحت گرمایش قرار گرفته تا تمام رطوبت جذب کرده را به جریان هوای خروجی تخلیه کند. جاذب بازیابی شده آماده‌ی استفاده‌ی مجدد است.بنابراین سیکل پیوسته‌ی جذب و احیا برقرار می‌شود.

جاذب‌های سطحی که عموماً مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: سیلیکاژل، غربال مولکولی[1] و آلومینای فعال شده[2]. بنابراین می‌توان مشاهده کرد که رطوبت زدایی شیمیایی بر اساس اصول جذب سطحی فیزیکی، روشی ساده‌تر و اقتصادی‌تر را جهت کنترل رطوبت ارائه می‌کند[٤].

۱-۲ سیستم‌های رطوبت زدایی توسط جاذب

جاذب‌های رطوبت موادی هستند که بخار آب را جذب کرده و نگه داری می‌کنند. با به کار گیری سیستم‌های جاذب، بارهای محسوس و نهان جدا می‌شوند.یک ماده‌ی جاذب به منظور جداسازی رطوبت توسط جذب یا جذب سطحی به کار می‌رود. پس از آن، جهت پایین آوردن دما به میزان مطلوب، سردسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سردسازی در دمایی بالاتر از یک سیستم تهویه مطبوع قدیمی انجام می‌شود که به موجب آن، COP عملیاتی بزرگ‌تری حاصل شده و کاهش هزینه‌های انرژی برای تهویه مطبوع امکان پذیر است. بدین ترتیب، تأمین هوایی با دما و رطوبت مورد نیاز، از طریق به کار بردن روش‌های سرمایش تبخیری و یا سایر روش‌ها امکان پذیر می‌گردد.

می‌توان این سیستم‌ها را برای ایجاد محیط‌های با رطوبت بسیار پایین (رطوبت نسبی ۱۰- ۵٪) به کار گرفت که در غیر این صورت و با به کار گیری تجهیزات تراکم- سردسازی، فراهم کردن این شرایط مشکل و پرهزینه است. سیستم‌های بازیابی انرژی بر پایه‌ی جاذب، در اصل بار حرارتی نهان را از تجهیزات به کار رفته برای جبران بار محسوس مجزا می‌کنند. این نوع سیستم‌ها اغلب در پروژه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که بار نهان بیشتر از مقداری است که توسط تجهیزات سرمایشی یکپارچه‌ی مرسوم می‌تواند انجام شود. هنگامی که کنترل رطوبت نسبی برای جلوگیری از رشد میکروب‌ها ضروری است، غالباً از این سیستم‌ها استفاده می‌شود. اصولاً سیستم‌های جاذب در کاربردهای تهویه مطبوع که جایگزین یا مکمل مناسبی برای سیستم‌های سردسازی مکانیکی هستند، در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرند که کنترل هم‌زمان دما و رطوبت مزیت مهمی برای مصرف کننده باشد[۵].

[1] molecular sieve
[2] activated alumina

موادی که جهت رطوبت زدایی به کار گرفته می‌شوند، ممکن است جامد یا مایع باشند؛ علاوه بر این که بایستی این مواد قادر به گرفتن رطوبت هوا باشند، در یک سیکل برگشت پذیر نیز باید بتوان این مواد سرشار از رطوبت را برای استفاده‌ی مجدد به حالت اول یعنی عاری از رطوبت بازگرداند. به طوری که گرفتن و پس دادن رطوبت مدام قابل تکرار باشد. همچنین عمل بازیابی مواد جاذب به حالت اول با استفاده از یک منبع حرارتی سطح پایین قابل انجام است.

۱-۳ تاریخچه‌ی جاذب‌ها

اولین بار در دهه ی۷۰ بود که جاذب‌های رطوبت در صنایع خاصی مانند داروسازی و تولید لوازم الکترونیکی که تولیدات آن‌ها حساس به رطوبت بود، مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین برای جلوگیری از ایجاد خوردگی و سایر زیان‌های ناشی از رطوبت به هنگام انبار کردن تولیدات نیز از جاذب‌ها استفاده شده است. در گذشته بیشتر جاذب‌های رطوبت از بسترهای فشرده‌ای از سیلیکاژل یا سایر ذرات دیگر تشکیل می‌شد. این بسترهای فشرده افت فشارهای بزرگی را ایجاد می‌کردند؛ به طوری که افزایش انرژی مصرفی لازم برای دمنده‌ها جهت تهویه‌ی فضای تهویه شونده را موجب می‌گردیدند.

سال‌های متمادی، شرکت مهندسی کارگوکیر[1] از چرخ‌های لانه زنبوری شکل که از ورقه‌های متخلخل یا ورقه‌های فایبرگلاس که به طور سینوسی موج دار شده بوده و لیتیم کلراید یا غربال‌های مولکولی در آن جاسازی شده بود، استفاده‌امی کرد. در اوایل دهه‌ی هشتاد، سولارکینگ[2] امریکا چرخ های ورقه ورقه‌ای را که در آن لیتیم کلراید جاسازی شده بود، توسعه داده و به بازار معرفی کرد. در همین زمان، برای اولین بار چرخ‌های لیتیم کلرایدی جهت رطوبت زدایی در سوپرمارکت‌ها به کار گرفته شد.

مزیت چرخ‌های جدید نسبت به فشرده این بود که ضمن ایجاد سطح تماس بیشتر جاذب با هوای ورودی، افت فشار نسبتاً کوچک‌تری را موجب می‌شدند.این چرخ‌های دوار با مشخصات ابعادی خاص جهت مصارف تهویه مطبوع بهتر و مناسب‌تر بودند.

در دهه‌ی ۸۰، تحقیقات بر روی مواد بهتر و همچنین ابعاد بهتر برای چرخ‌ها با ساختمان لایه‌ای یا ورقه‌ای در جهت کم کردن میزان افت فشار متمرکز گردید. مشکلی که بر چرخ‌های لیتیم کلرایدی مترتب بود، این بود که در شرایط رطوبت نسبی بالا، احتمال اشباع شدن لیتیم کلراید و چکه کردن آب از آن وجود داشت؛

[1] Cargo Caire
[2] Solar King

در حالی که چرخ‌هایی که در آن سیلیکاژل به کار رفته بود، این مشکل را نداشته و برای سالیان متمادی به عنوان بهترین ماده‌ی انتخابی به این منظور مورد استفاده قرار گرفت.

در اوایل دهه‌ی ۹۰، شرکت مونترزکارگوکیر[۱] در خط تولید خود از تیتانیوم آغشته به سیلیکاژل در چرخ‌ها استفاده کرد. تولیدکنندگان دیگر از پیشنهادی که در سال ۱۹۸٦ توسط کویلر ارائه گردید، پیروی کردند؛ با این عنوان که یک جاذب مطلوب برای کاربرد در تهویه مطبوع، بایستی ایزوترمی مشابه 1M داشته باشد. این ماده‌ی جاذب در شرایط رطوبت نسبی متوسط باید بتواند بیشترین درصد جذب خود را نسبت به حداکثر توان جذب رطوبت در مقایسه با سیلیکاژل داشته باشد. شرکت لاروشه[۲] ، چندین سال را صرف توسعه‌ی رطوبت زداهای دواری کرد که در آن‌ها از جاذب نوع 1M با گذرگاه‌های هوایی سینوسی شکل استفاده شده است، نموده است. شرکت انگلهارد[۳] ، رطوبت زداهای دواری را تولید و به بازار عرضه کرده که در آن‌ها از ماده‌ی تیتانیوم سیلیکات استفاده شده به طوری که راه‌های هوایی در این چرخ‌ها به شکل هشت گوش طراحی شده است.

در سال ۱۹۹۵، وزارت انرژی ایالات متحده‌ی امریکا برنامه‌ای ترتیب داد تا در جهت یکپارچه سازی فناوری جاذب در زمینه‌ی بازار مربوط به تهویه مطبوع ساختمان‌ها به صنایع کمک کند. چرا که ذخیره سازی و در واقع صرفه جویی در مصرف انرژی و همچنین لزوم افزایش کیفیت هوا در فضاهای تهویه شونده، مسجل شده بود. در حال حاضر، آزمایشگاه سازمان ملی انرژی‌های تجدید پذیر امریکا قواعدی را برای پارامترهای عملکردی مخصوص هر سازنده وضع کرده که محدوده‌ی تغییرات در شرایط هوای ورودی را نشان دهد؛ چرا که کاربران بتوانند به راحتی و از روی آگاهی تصمیم بگیرند. از آن جایی که سیستم‌های سرمایشی و رطوبت زدای جاذب تا اندازه‌ی زیادی متفاوت از سیستم‌های قبلی است، بایستی جهت مورد قبول واقع شدن آن، عموم مردم از مزایا و ارزیابی عملکرد آن آگاهی پیدا کنند[٦].

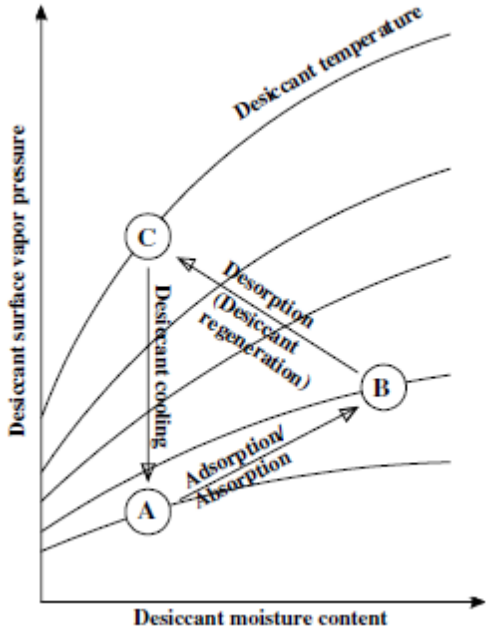
۱-٤ فرآیند عملکرد جاذب‌ها

عمل خشک کردن هوا توسط جاذب‌ها بدون این که هیچ گونه انرژی گرمایی به هوای ورودی داده یا از آن گرفته شود، انجام می‌شود. از این رو این فرآیند مانند حالت عکس فرآیند سرمایش تبخیری، یک فرآیند

[۱] Munters Cargo Cair
[2] La Roche Chemical, Inc.
[3] Engelhard

آدیاباتیک بوده و دقیقاً مانند فرآیند سرمایش تبخیری، جاذب‌ها در امتداد یک خط رطوبت سنجی با دمای مرطوب ثابت عمل می‌کنند.

در خلال فرآیند سرمایش تبخیری، گرمای محسوس به گرمای نهان تبدیل شده به طوری که نتیجه‌ی آن تولید هوای خنک‌تر با رطوبت بیشتر است. در حالی که طی فرآیند عملکرد جاذب‌ها، گرمای نهان است که به گرمای محسوس تبدیل شده و نتیجه‌ی نهایی آن تولید هوای داغ با رطوبت کم‌تر است.



شکل ۱-۱ چرخه ی رطوبت زدایی توسط جاذب [۷]

حال به شرح مراحل رطوبت زدایی شیمیایی در شکل فوق می‌پردازیم.

A-B :در نقطه‌ی A، جاذب سرد و خشک است؛ با جداسازی بخار آب از هوای فرآیندی، فشار بخار در سطح جاذب بیشتر شده و به مقدار فشار بخار در هوای محیط می‌رسد؛ این برابری در نقطه‌ی B رخ می‌دهد. بنابراین مهاجرت بخار آب متوقف می‌شود.

B-C: جاذب از معرض هوای فرآیندی خارج شده، گرم می‌شود و در معرض جریان هوای متفاوتی (هوای بازیابی که سپس به اتمسفر تخلیه می‌شود) قرار داده می‌شود: جهت گرادیان تغییر کرده و مهاجرت بخار آب از سطح جاذب به جریان هوا رخ می‌دهد. در نقطه‌ی C ، محتوای رطوبت مقدار اولیه‌ی خود (A) را داشته اما فشار بخار بزرگ‌تر خواهد بود، زیرا ماده‌ی جاذب به دمای بالا می‌رسد.

C-A : ماده‌ی جاذب تا دمای نقطه‌ی شروع سرد می‌شود. مقادیر محتوای رطوبت و فشار بخار آب به مقادیر اولیه‌ی خود باز می‌گردند. این سیکل می‌تواند تکرار شود.

از توصیف این سیکل چنین نتیجه می‌شود که فرآیند چرخه‌ای A-B-C نیاز به انرژی حرارتی دارد: گرمایش حین فرآیند B-C (بازیابی یا احیا) و سرمایش طی فرآیند C-A [۷].

۱-۵ معرفی سیستم‌های جاذب

در این قسمت به بررسی مزایا، معایب، کاربردها، بازده و فناوری‌های مرتبط با سیستم‌های جاذب در تهویه مطبوع می‌پردازیم.

۱-۵-۱ مزایا

در صورتی که سیستم‌های جاذب به طور صحیح طراحی شده و به کار گرفته شوند، مزایای زیر را خواهند داشت:

- کنترل مستقل بار حرارتی نهان در هوای تهویه
- حذف میعان بخار آب روی کویل های خنک کننده و کاهش میزان رطوبت در کانال‌ها (این امر قطعاً مانع از رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها شده و می‌تواند به پیش گیری از مشکلات کیفیت هوای داخل کمک نماید.)
- میزان رطوبت کمتر در فضاهای مورد استفاده، میزان آسایش معادلی را در دمای محیط بالاتر تأمین می‌کند. این امر باعث می‌شود که مقدار مقرر دمای آب خنک کننده افزایش یافته و به موجب آن صرفه جویی انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی سیستم را داشته باشیم.
- کاهش بار سرمایش مکانیکی، امکان استفاده از چیلرهای کوچک‌تر و حتی الامکان کانال سازی کوچک‌تر را در ترکیب جدید فراهم می‌کند. جبران هزینه‌ها در این ترکیب بایستی در هر ارزیابی اقتصادی لحاظ شود.

۱-۵-۲ معایب

هرچند شرایط طراحی خاصی وجود دارد که سیستم‌های سرمایشی جذبی/ تبخیری اقتصادی هستند، اما پیچیدگی چنین سیستم‌هایی، پذیرش آن‌ها را به خصوص در شرایطی که نیروی انسانی عملیاتی کارآمد موجود نباشد، محدود می‌کند. سایر معایب این سیستم‌ها عبارتند از:

- افزایش هزینه‌ی اولیه
- افزایش نگه داری تجهیزات جاذب افزوده شده
- هزینه‌ی انرژی (معمولاً گاز طبیعی) به منظور بازیابی جاذب در دمای بالا جهت خارج کردن رطوبت موجود
- در برخی از موارد، نیازمندی به لوله کشی آب خنک کننده (معمولاً برج) برای جداسازی گرمای جذب و پیش سرمایش هوای گرم شده‌ی خروجی از واحدهای جاذب

۱-۵-۳ کاربردها

تغییرات ایجاد شده در نقشه و کاربری ساختمان‌ها به واسطه‌ی عایق کاری بیشتر، پنجره‌های بهتر و روشنایی پربازده تر، بار سرمایش محسوس کمتری را موجب شده است. علاوه بر این، ملزومات بیشتر هوای تهویه همراه با تراکم بیشتر ساکنین ساختمان‌ها، بار رطوبت زدایی بیشتری را که به مفهوم بار (رطوبتی) نهان بیشتر است، نتیجه می‌دهد.

سیستم‌های مرسوم، از سردسازی جهت تأمین هر دو نوع سرمایش محسوس (پایین آوردن دمای هوا) و سرمایش نهان (رطوبت زدایی هوا) استفاده می‌کنند. به منظور دست‌یابی به رطوبت نسبی مطلوب پایین‌تر در برخی از محیط‌ها، جهت جداسازی کافی رطوبت، بایستی هوا را بیش از مقدار مورد نیاز برای بار محسوس سرد کرده و سپس جهت پیش گیری از سرمایش بیش از حد، مجدداً گرم کرده و در نتیجه مصرف انرژی افزایش می‌یابد.سیستم‌های جاذب به همراه سرمایش مکانیکی، قادرند نیاز به گرمایش مجدد را برطرف کنند.

سیستم‌های جاذب معمولاً در فرآیندهای صنعتی که رطوبت بسیار کم ضروری است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سایر کاربردها شامل حفظ رطوبت کنترل شده در انبارهای ذخیره سازی، نگه داری کشتی‌ها و سایر تجهیزاتی از این قبیل که در نتیجه‌ی تراکم رطوبت تخریب می‌شوند و همچنین خشک کردن هوا جهت تسریع خشک کردن محصولات حساس به حرارت می‌باشد.

۱-۵-٤ بهترین موارد کاربرد

می‌توان سیستم‌های جاذب را برای ایجاد محیط‌های با رطوبت بسیار پایین (رطوبت نسبی ۱۰- ۵٪) مورد استفاده قرار داد که در غیر این صورت استفاده از تجهیزات سرمایشی- تراکمی مشکل و پرهزینه خواهد بود. داروسازی و سایر صنایعی که تولید کننده‌ی محصولات آب دوست هستند، نیازمند محیط‌های عملیاتی با رطوبت پایین می‌باشند. غالباً نبات، دانه و تولید فیلم عکاسی جهت تسریع خشک کردن محصولات به هوای

خشک نیازمندند. می‌توان جاذب‌ها را برای باز آرایی یک طرح که در آن تجهیزات قدیمی نصب شده قادر به حفظ میزان رطوبت مطلوب نبوده یا در جایی که شرایط باعث ایجاد یک مشکل رطوبتی می‌شود، مورد استفاده قرار داد. غالباً جهت بهبود عملکرد، لوله‌های گرمایی به همراه سیستم‌های جاذب به کار گرفته‌امی شوند. بهترین موارد کاربرد سیستم‌های جاذب جایی است که:

- رطوبت بسیار پایین (رطوبت نسبی کمتر از ۳۰٪) مورد نیاز باشد،
- بار حرارتی نهان در مقایسه با بار محسوس بیشتر باشد،
- هزینه‌ی احیای جاذب در مقایسه با هزینه‌ی سرمایش هوا تا پایین‌تر از دمای نقطه‌ی شبنم کمتر باشد،
- بایستی به وسیله تجهیزات مکانیکی، هوا را تا نقطه‌ی شبنم زیر نقطه‌ی انجماد[1] خنک کرد،
- فرآیند، نیازمند تأمین مداوم هوا در دماهای زیر نقطه‌ی انجماد باشد. در نتیجه با رطوبت زدایی از هوا توسط جاذب، مشکل برفک زدگی روی کویل های سرمایشی به حداقل رسانده می‌شود.

۱-۵-۵ کاربردهای ممکن

ملزومات تغییر برای هوای تهویه افزایش یافته یا همان افزایش بار نهان، می‌تواند کاربرد این سیستم‌ها را خصوصاً در مواقع افزایش هزینه‌های برق در ساعات اوج مصرف افزایش دهد.با نسبت‌های گرمای محسوس پایین، ممکن است رطوبت نسبی افزایش یافته و منجر به رشد کپک و قارچ همراه با شرایط محیط نامساعدتر شود.همچنین سرمایش جذبی در تمام سیستم‌های هوایی که ۱۰۰٪ هوای بیرون مورد نیاز است (اتاق‌های تمیز[2]، اتاق‌های عمل بیمارستان‌ها، آزمایشگاه‌ها و برخی از رستوران‌ها)، در سوپرمارکت‌ها، در آب و هوای مرطوب و پیست‌های یخ در نظر گرفته می‌شود.

هتل‌ها از سیستم‌های جاذب برای تأمین هوای جبرانی خشک جهت داشتن فشار کمی مثبت در راهروها استفاده می‌کنند. این کار، میزان هوای مرطوب بیرون را که از طریق پنجره‌ها و دیوارهای بیرونی توسط سیستم تخلیه‌ی توالت به داخل اتاق‌ها کشیده می‌شود، به حداقل می‌رساند. همچنین هوای با میزان رطوبت کمتر، خسارت‌های ناشی از قارچ‌ها و کپک‌ها و هزینه‌های ناشی از تعویض اسباب و وسایل و پوشش دیوارها را کاهش می‌دهد.

[1] subfreezing
[2] clean rooms

در بسیاری از موارد، سایر روش‌ها مانند ذخیره سازی یخ، پیش سرمایش هوای تهویه و واحدهای دو مسی ره می‌توانند نتیجه‌ی مطلوب را با صرف هزینه‌های اولیه و عملیاتی پایین‌تری ارائه کنند.

واحدهای جاذب مورد استفاده در سوپرمارکت‌ها، نه تنها رطوبت محیط را کاهش داده بلکه باعث بهبود عملکرد انرژی، افزایش آسایش ساکنین و حتی بهبود احتمالی فروش می‌شود.دو سوال عمده‌ی مطرح در این زمینه عبارتند از:

- کدام روش نصب مقرون به صرفه‌تری دارد؟
- کدام روش، بهترین سیستم را جهت نصب در یک کاربرد مشخص ارائه می‌کند؟

۱-۵-٦ موارد اجتناب از به کار گیری جاذب‌ها

در کاربردهایی که رطوبت بسیار پایین مورد نیاز نبوده (رطوبت نسبی کمتر از ٤٠٪) یا در مواردی که انرژی خارجی جهت گرمایش مجدد مورد نیاز نیست، معمولاً روش‌های دیگری وجود دارد که ممکن است جهت دست‌یابی به میزان رطوبت مورد نیاز، بهتر و اقتصادی‌تر باشند مانند پیش سرمایش هوای تهویه، واحدهای دو مسیره، لوله‌های گرمایی، ذخیره سازی حرارتی بر پایه‌ی یخ و ترکیبی از این فناوری‌ها.

۱-۵-۷ بازده

ترکیب رطوبت زدایی توسط جاذب و سرمایش مکانیکی، این امکان را فراهم می‌کند که سیستم آب سرد یا انبساط مستقیم، در دمای تبخیرکننده ی بالاتری عمل کرده و بنابراین بازده بیشتر و هزینه‌های عملیاتی پایین‌تری را نتیجه می‌دهد. این مقدار به ملزومات مکانی بستگی دارد. هرچه سرعت ظاهری جریان هوا از درون جاذب کمتر بوده و رطوبت هوای ورودی بیشتر باشد، رطوبت بیشتری از هوا جذب خواهد شد. افزودن سیستم دو چرخ، مقدار سرمایش مکانیکی و گرمای لازم جهت بازیابی جاذب را کاهش می‌دهد.

از آن جا که تجهیزات جاذب در صورت به کار گیری صحیح، بادوام و پربازده می‌باشند، لزومانی ازمند نگه داری خاصی هستند. بنابراین فیلتر کردن مناسب دو جریان هوا (جریان هوای ورودی و خروجی) ضروری است. همچنین بایستی سیستم فیلتر به طور مشخص برای پرسنل تعمیر و نگه داری قابل رویت بوده، به سهولت بازرسی، جداسازی و جایگزین شده و می‌بایست یک برنامه‌ی منظم نگه داری تنظیم شده و مطابق آن عمل شود. در صورتی که جاذب جامد توسط ذرات ریز مسدود شده یا خواص جاذب مایع به واسطه‌ی

ذرات حمل شده تغییر کند، بازدهی آن به سرعت کاهش یافته و ممکن است موجب تعویض زودهنگام آن شود.

چرخ‌ها و سازوکار های چرخش برای نیروی انسانی بخش تعمیر و نگه داری قابل رویت بوده و امکان بازرسی، نگه داری و تعمیر به آسانی مهیا باشد. همچنین از آن جا که در صورت نشت هوای مرطوب به داخل کانال هوای خشک یا درون خود واحد، بازدهی سیستم به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، بایستی تمهیداتی اندیشید تا از ایجاد حفره یا باز ماندن دریچه‌ها اجتناب شود. طول عمر مورد انتظار چرخ، وابسته به عملکرد صحیح سیستم احیاست.

۱-۵-۸ انواع فناوری‌های مرتبط

دو نوع گسترده از این فناوری وجود دارد: سیستم‌های جاذب جامد و سیستم‌های جاذب مایع.

سیستم‌های جاذب مایع از تجهیزات مشابه شست و شو دهنده‌های پاششی هوا[1] همراه با احیای جزئی استفاده می‌کنند. این نوع سیستم‌ها عموماً برای کاربردهای صنعتی بزرگ به کار گرفته می‌شوند.

مواد خنثی به جاذب‌های جامد، معدنی و بلوری آغشته شده و در واحدی همراه با یک چرخ حرارتی کندو مانند مورد استفاده قرار می‌گیرند. عموماً این جاذب‌ها برای کاربردهای تجاری تهویه مطبوع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سیستم‌های جاذب جامد در واحدهای بسته بندی کارخانه به صورت تک چرخ یا دوچرخ موجود می‌باشند.واحدهای تک چرخ،شامل یک چرخ جاذب، کویل خنک کننده و کویل گرمایش مجدد (گاز داغ، الکتریکی، بخار، آب داغ و ...) می‌باشد.هوای بیرون توسط جاذب رطوبت زدایی شده، یک کویل خنک کننده دمای هوا را تا نقطه‌ی شبنم مطلوب کاهش داده و کویل گرمایش مجدد، دمای هوا را تا دمای حباب خشک مطلوب افزایش می‌دهد.

واحدهای دو چرخ از یک چرخ جاذب و یک چرخ حرارتی (فقط از نوع حرارت محسوس) همراه با کویل آب سرد مرسوم یا کویل انبساط مستقیم استفاده می‌شود.در حین عمل سرمایش، چرخ حرارت محسوس به عنوان یک پس سردکننده (تا حدودی هوای داغ خشک خروجی از چرخ جاذب را خنک می‌کند در حالی که

[1] spray air washers