بیشـتر سـاختمان‌های بزرگ تجاری، صنعتی و آموزشی، برای مصرف آب گرم خانگی و گرمایش آبی (هیدرونیک) خود، به آب گرمی با دمای ۱۱۵ تا ۱۷۰ درجه‌ی فارنهایت (۴۶ تا ۷۷ درجه‌ی سـانتی‌گراد) نیـاز دارند. این نیاز معمولا با اسـتفاده از آبگرم‌کن‌هایی که با سوخت‌های فسیلی کار می‌کنند، تامین می‌شود. هم زمان با تولید این میزان حرارت، سـامانه‌ی تهویه‌ی مطبوع، حرارتی با دمای کم را دفع می‌کند. با اسـتفاده از «پمپ‌های حرارتی آب به آب»، می‌توان از این حرارت تلف شده، در راستای کاهش مصرف انرژی استفاده کرد.

این تجهیزات به اندازه‌ی قابل ملاحظه‌ای مصرف انرژی را کاهش می‌دهند و هزینه‌ی اولیه‌ی خود را به زودی جبران می‌کنند. یک پمپ حرارتی با اسـتفاده از یـک چرخه‌ی تراکم بخار، گرما را از یک منبـع کم دما دریافت کرده و دمای آن را تا مقدار قابل اسـتفاده‌ای، بالا می‌برد. سـامانه‌های تهویه‌ی مطبوع، چیلر و سـامانه‌های تبرید در این تعریف گنجانده می‌شوند، ولی گرمایی که توسط آن‌ها تولید می‌شود، اغلب بدون استفاده هدر می‌رود.

عبـارت پمپ حرارتی معمولا به تجهیزاتـی اختصاص می‌یابد که گرمایی با دمای بالاتر را برای کاربردهای مفید ایجاد می‌کنند. به‌عنوان مثال، در کاربردهای خانگـی، یک پمپ حرارتی هوا به هوا، گرما را در فصل گرمایش از هوای بیرون گرفته و دمای آن را تا اندازه‌ای بالا می‌برد که برای گرمایش فضای خانه مناسب باشـد. یک پمپ حرارتـی خانگی منبع زمینی نیز، می‌توانـد حرارت را به همین منظور از زمین دریافت کند.

در کاربردهای مربوط به سـاختمان‌های بزرگـی که موضوع این مقاله می‌باشند، پمپ حرارتی آب به آب، کاربرد دیگری را ارایه می‌کند. یک پمپ حرارتی آب به آب می‌تواند مجموعه‌ای از اجزا باشـد که در محل سـوار می‌شوند و یا به صورت یک سامانه‌ی یکپارچه در کارخانه ساخته می‌شود. شکل دوم پمپ حرارتی آب به آب می‌تواند یک چیلر آب–خنک باشد که به جای این که آب سرد را در دمای خاصی تولید کند، به‌گونه‌ای اصلاح شـود که آب گرم را در دمایی مشـخص تولید نمایـد. در یک چیلر، کار مفیـد جذب حرارت از آب در اواپراتور انجام می‌شـود. در پمپ حرارتی آب به آب، کار مفید، خروج حرارت از کندانسـور می‌باشـد (اگر چه پمپ‌های حرارتـی آب به آب را گاهی اوقـات به صورت هم زمـان به عنوان خنک‌کننده‌ی آب نیز اسـتفاده می‌کننـد). در این مقاله، در مورد پمپ‌های حرارتی آب به آب یکپارچه‌ای صحبت خواهد شـد که در کارخانه سوار شده و ظرفیت آن‌ها به اندازه‌ای است که می‌توانند ۵۰۰ MBtu/h (۱۴۵ kW) گرما تولید کنند. دمای کندانسور در پمپ‌های حرارتی آب به آب بالاتر از چیلرها می‌باشـد، بنابراین همه‌ی چیلرهای آب–خنک نمی‌تواننـد چنین وظیفه‌ای را به عهده بگیرند.

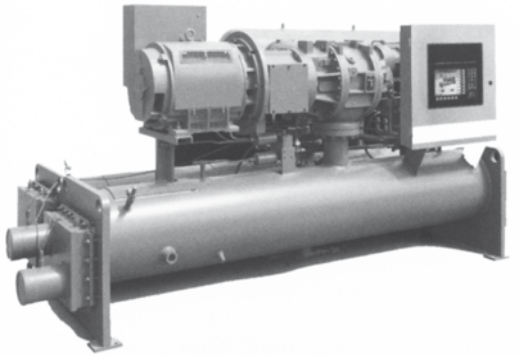
چیلرهـای جذبی بر خـلاف چیلرهای مکانیکـی، نمی‌توانند وظیفه‌ی پمپ حرارتـی را با بازده مناسـبی انجام دهند. بنابراین در ایـن مقاله، بحث به کاربرد پمپ‌های حرارتی آب به آب با کمپرسـورهای سـانتریفوژ تک و چند مرحله‌ای و همچنین پمپ‌های حرارتی آب به آب با کمپرسـور پیچی تک مرحله‌ای محدود خواهد شد.

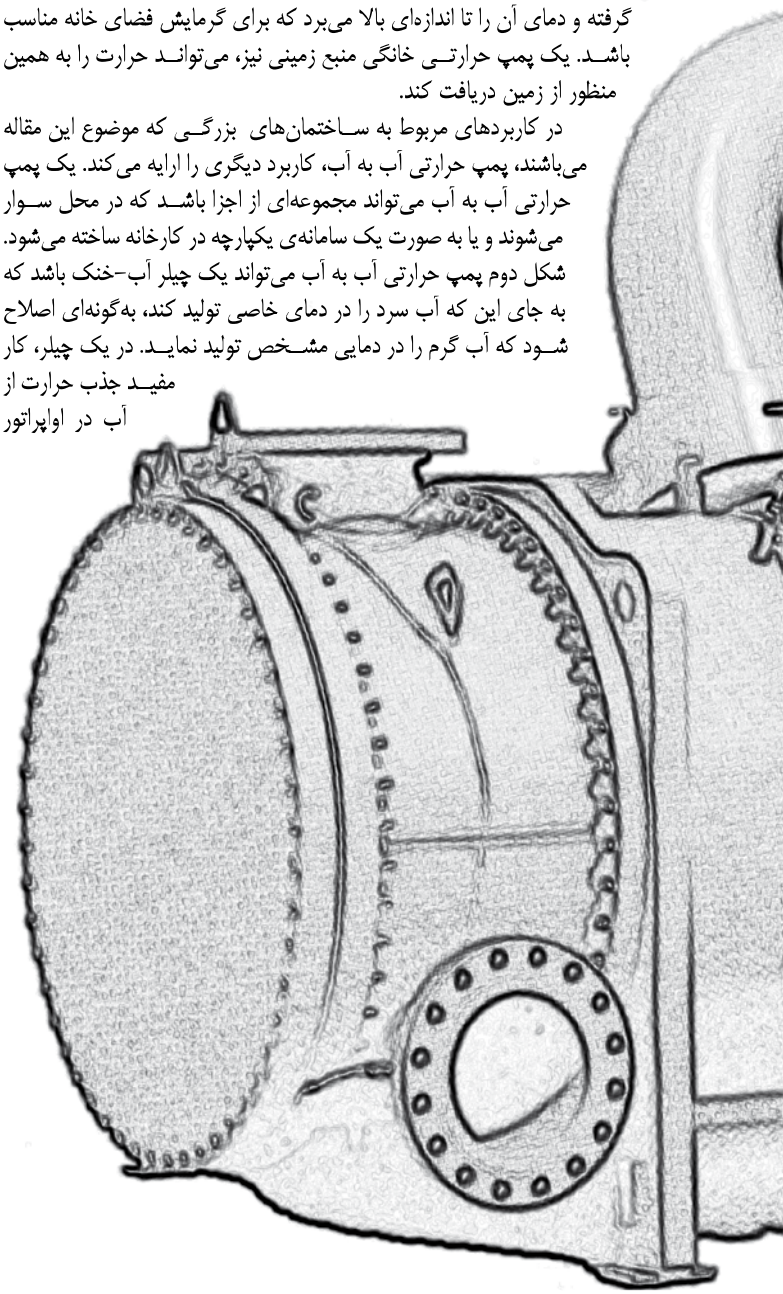
پمپ‌های حرارتی آب به آب سـانتریفوژ (شـکل ۱)، می‌توانند آب گرمی با دمای ۱۱۵ تا ۱۷۰ درجه‌ی فارنهایت (۴۶ تا ۷۷ درجه‌ی سانتی‌گراد) را در ظرفیت دفـع حرارتی از ۳۰۰۰ تـا ۷۴۰۰۰ MBtu/h (۸۸۰ تا ۲۱۷۰۰ kW) تولید کنند. محدوده‌ی کاری پمپ‌های حرارتی آب به آب پیچی (شـکل ۲) کوچک‌تر اسـت و آب گـرم را معمولا تا دمای ۱۳۰ درجه‌ی فارنهایت (۵۴ درجه‌ی سـانتی‌گراد) و ظرفیـت دفع حرارت از ۵۰۰ تـا ۵۶۰۰ MBtu/h (۱۴۵ تا ۱۶۴۰ kW) تولید می‌کنند.

عملکرد هر دو نوع مذکور بر اسـاس حداقل دمای منبع حرارت ۴۰ درجه‌ی فارنهایت (۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) می‌باشد. ترتیب کارکرد پمپ‌های حرارتی آب به آب در شکل (۱) نشان داده شده است. آب از منبع حرارتی، حرارت را به اواپراتور پمپ حرارتی حمل می‌کند (۱). مبرد موجود در اواپراتور، گرمای کم دما را از آب گرفته (۲) و سـپس به منبع بر می‌گرداند تا حرارت بیشـتری را کسـب کند (۳). مبرد حرارت را به کمپرسـور برده (۴) و در آنجا فرآیند تراکم موجب می‌شـود دما و فشـار آن بالا رود (۵). سـپس این مبرد، گرمایی با دمای بالاتر را به کندانسور منتقل می‌کند (۶). آب از چاه حرارتی وارد کندانسـور می‌شـود (۷) و حرارت را از مبـرد گرفته (۸) و به جاذب حرارتی (sink) منتقل می‌کند (۹) و در همان زمان مبرد به اواپراتور بر می‌گردد تا گرمای بیشـتری را دریافت کند. در ساختمان‌های بزرگ مورد نظر مقاله‌ی ما، چه منابع حرارتی وجود دارد؟

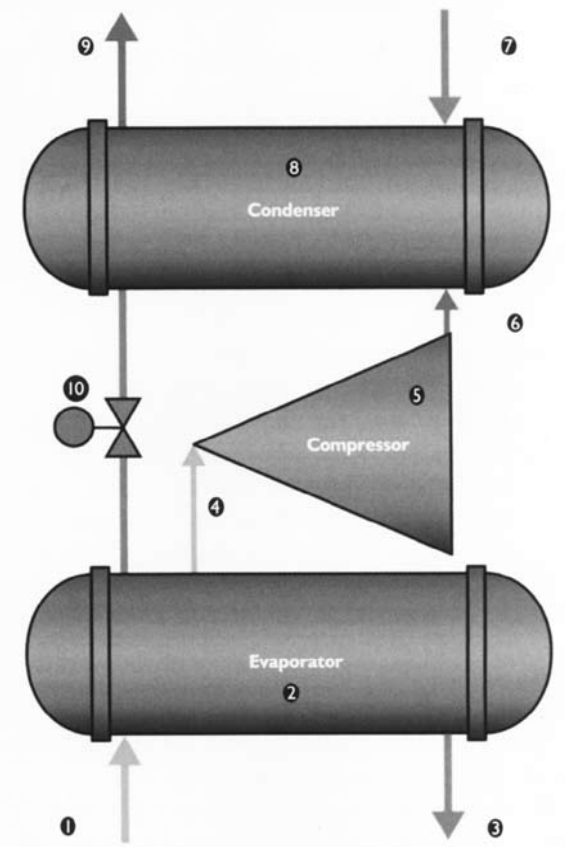
در استاندارد ANSI/ASHRAE/IESNA ۹۰.۱–۲۰۰۴ با عنوان «استاندارد انرژی برای سـاختمان‌ها، غیر از ساختمان‌های مسکونی کم طبقه»، توصیه شده اسـت که جریان‌هـای هوای خروجی و جریـان آب کندانسـور در موارد خاص، به‌عنوان منبع حرارتی اسـتفاده شـوند. منبع احتمالی دیگر، جریان سـیال فرآیند

تصویر ۱





شکل (۱) ترتیب کاری یک پمپ حرارتی آب به آب



می‌باشد. جاذب‌های حرارتی شامل جریان هوای بیرون، جریان‌های آب خانگی و جریان سیالات فرآیند می‌باشند.

بررسی اقتصادی

بهتریـن راه بـرای ارزیابی بازده یک پمپ حرارتـی آب به آب در برابر یک آبگرم‌کن، این است که ضریب عملکرد (COP) پمپ حرارتی با بازده حرارتی آب گرمکن مقایسـه شـود. به بیان ساده، هر دو این معیارها با تقسیم انرژی خروجی بر انرژی ورودی محاسـبه می‌شـوند. در هر دو مورد، انرژی ورودی همان انرژی است که به سامانه تغذیه می‌شود و انرژی خروجی، گرمای مفید تولید شده است. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، بنا به تعریف یک آب‌گرم‌کن با بازده ۸۵ درصد دارای بازده حرارتی تنها ۰/۸۵ می‌باشد. ولی پمپ حرارتی آب به آب بزرگی که در شـکل (۳) نشان داده شده است، تحت شرایط نشان داده شده، دارای ضریب عملکردی بیش از ۳/۸ است. به محاسبات زیر توجه کنید:

گرمای تولید شده در کندانسور برابر است با:

توان ورودی برابر است با:

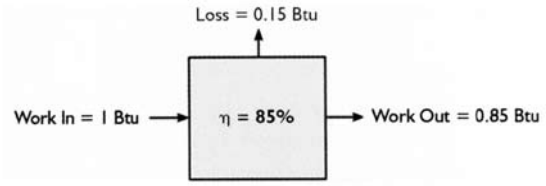
1490 kW 3.415 MBtu/h/kW = 5088 MBtu/h

و در نتیجه مقدار COP برابر است با:

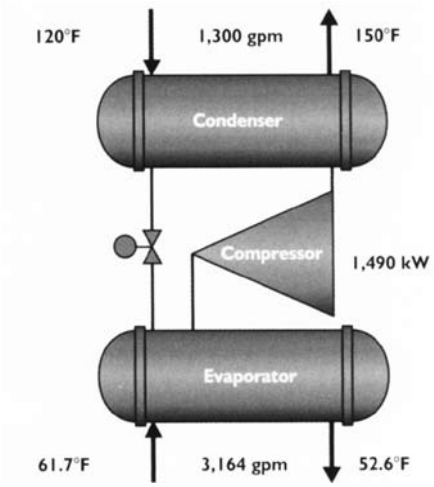
19500 / 5088 = 3.83

ایـن مقادیر نشـان می‌دهند کـه بازده پمـپ حرارتی در حـدود ۴/۵ برابر آب‌گرم‌کن داده شـده می‌باشـد. بازده بسـیاری از پمپ‌های حرارتی، از این هم بیشـتر اسـت. با این حال، پمپ‌های حرارتی آب به آب و آب‌گرم‌کن‌ها، معمولا دارای منابع انرژی متفاوتی می‌باشند:

شکل (۲) بازده حرارتی آبگرم‌کن



شکل (۳) ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی آب به آب



پمپ‌های حرارتی از برق و آب‌گرم‌کن‌ها معمولا از نفت یا گاز طبیعی استفاده می‌کنند. حال این پرسش پیش می‌آید که چگونه ضریب‌های عملکرد متفاوت و منابع انرژی را به صورت هزینه‌های انرژی بیان کنیم؟

جدول (۱)، ارزش حرارتی و متوسـط قیمت بعضی از این سوخت‌ها را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن داده‌های این جدول، در اینجا هزینه‌ی تولید ۱۰۰,۰۰۰ Btu/h حرارت را برای مقایسه در موارد مختلف محاسبه می‌کنیم.

در مورد آب‌گرم‌کن نفتی داریم:

ساعت ۱× گالن/$۱.۷۹ × Btu۱۴۰۰۰۰/گالن۱ × بازده ۱۰۰۰۰۰ Btu/h ۰.۸۵

= ۱.۵۰دلار

آب گرمکن گازی: ساعت ۱× ft۳/$۱۰.۷۵/۱۰۰۰ft۳ × Btu۱۰۰۰/ft۳۱ × بازده ۱۰۰۰۰۰ Btu/h ۰.۸۵

=۱.۲۶دلار

در پمپ حرارتی آب به آب برقی: kwh/$۰,۰۷× ساعت ۱ × /Btu ۳۴۱۵ kwh بازده ۱۰۰۰۰۰ Btu/h۳.۸۳

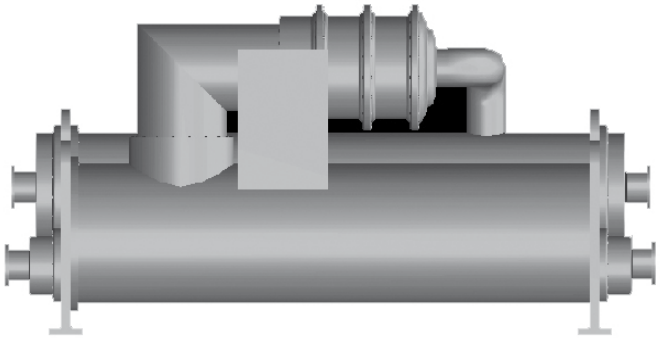
= ۰.۵۴ دلار

بنابراین، هزینه‌ی تولید انرژی با یک پمپ حرارتی، بیش از ۶۵ درصد کمتر از یک آب‌گرم‌کن با سـوخت فسیلی می‌باشـد. اگر ضریب عملکرد پمپ حرارتی بیشتر باشد، هزینه‌ی انرژی باز هم پایین‌تر خواهد بود.

مثال‌های کاربردی

در مواردی که هزینه‌ی سـوخت‌های فسـیلی بالا بوده و سیر صعودی دارد،

صرفه‌ی اقتصادی یک پمپ حرارتی آب به آب بیش از پیش جالب توجه می‌شود، زیرا قیمت برق به نسبت ثابت می‌باشد. طراحان و مالکان ساختمان‌هایی که از پمپ‌های حرارتی آب به آب استفاده می‌کنند، متوجه بالارفتن انرژی HVAC، کمتر شدن هزینه‌ی انرژی ساختمان‌ها و برگشت سرمایه سریع‌تر گردیده‌اند. این موارد در مثال‌های زیر به‌خوبی تشریح شده است.



کاربرد اول- بیمارستانی در تگزاس

بیمارستانی در تگزاس، در تمام طول سال به آب گرم خانگی با دمای ۱۵۰ درجه‌ی فارنهایت (۶۶ درجه‌ی سانتی‌گراد) نیاز دارد. این بیمارستان برای تامین آب گرم مورد نیاز خود، از یک آب‌گرم‌کن با سوخت فسیلی استفاده می‌کند. از آنجایی که آب و هوای ایالت تگزاس گرم است، سه چیلر به‌طور هم زمان در آن مشغول به‌کار هستند.

گرمای کندانسور چیلرها، از طریق برج‌های خنک‌کن به اتمسفر دفع می‌شد. به نظر شما آیا امکان دارد که از گرمای موجود در آب کندانسور چیلرها برای گرم‌کردن آب گرم خانگی مورد نیاز استفاده کرد؟ پاسخ به این پرسش مثبت است، ولی درجه‌ی حرارت این گرما پایین است.

آب کندانسورها در دمایی بین ۶۱ تا ۹۳ درجه‌ی فارنهایت (۱۶ تا ۳۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) از چیلرها خارج شده و به سمت برج‌های خنک‌کن هدایت می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، بخشی از آب کندانسور هر یک از چیلرها را می‌توان به سمت یک پمپ حرارتی آب به آب سانتریفوژ ترکیبی، که دارای دو کمپرسور سری می‌باشد، هدایت کرد.

این پمپ حرارتی، گرمای موجود در آب کندانسور را دفع می‌کند و سپس آب خنک‌شده به آبی که از برج‌های خنک‌کن خارج می‌شود، ملحق خواهد شد. این پمپ حرارتی که قادر است بیش از ۱۹۵۰۰MBtu/h (۵۷۱۰ kW) حرارت تولید کند، دمای این مقدار گرما را بالا می‌برد، به گونه‌ای که می‌تواند آب گرم خانگی مورد نیاز بیمارستان را از ۱۲۰ درجه‌ی فارنهایت به ۱۵۰ درجه‌ی فارنهایت (۴۹ درجه‌ی سانتی‌گراد به ۶۶ درجه‌ی سانتی‌گراد) برساند. ضریب عملکرد این پمپ حرارتی، بسته به دمای آبی که از کندانسور چیلرها خارج می‌شود، بین ۳/۸ تا ۵/۷ خواهد بود. اگر چه این بیمارستان هنوز برای سرمایه‌گذاری بر روی پمپ حرارتی آب به آب مورد نظر تصمیم‌گیری نکرده است، ولی تحلیل‌های اقتصادی انجام شده، امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی را تایید می‌کنند. اطلاعات زیر، از بیمارستان دریافت شده است. این تحلیل توسط یک برنامه‌ی نرم‌افزاری انرژی سامانه‌ی چیلر و با استفاده از اطلاعات آب و هوایی مربوط به شهری که بیمارستان در آن واقع شده است و همچنین یک بار فرضی بر اساس اطلاعات ثبت شده در دفتر اپراتوری بیمارستان، انجام گرفته است.

نتایج تحلیل به صورت زیر می‌باشد: هزینه‌ی سالانه‌ی گاز طبیعی که توسط آب‌گرم‌کن مصرف می‌شود: ۲۲۹۴۰۰۰ دلار؛ هزینه‌ی سالانه‌ی برق مصرف شده توسط پمپ حرارتی آب به آب: ۸۱۴۰۰۰ دلار؛ کاهش هزینه‌ی سالانه‌ی انرژی در صورت استفاده از پمپ حرارتی آب به آب: ۱۴۸۰۰۰۰ دلار. با توجه به این که هزینه‌ی اولیه‌ی مربوط به خرید پمپ حرارتی آب به آب تنها ۴۰۸۰۰۰ دلار بیشتر از آب‌گرم‌کن برآورد می‌شد (با فرض یکسان بودن هزینه‌ی نصب)، وضعیت برگشت سرمایه بسیار جالب توجه بود.

کاربرد دوم- بیمارستانی در اونتاریو

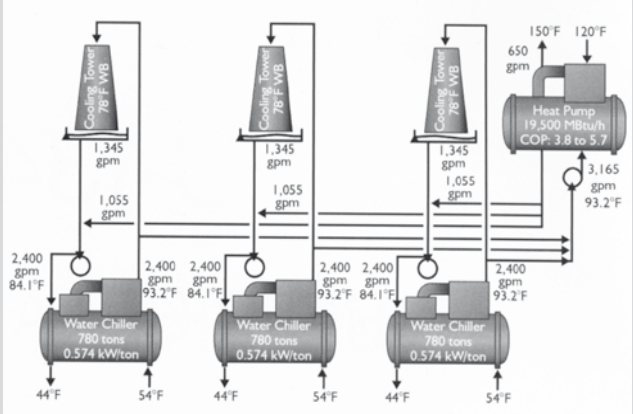
یک بیمارستان در اونتاریو، برای گرم‌کردن هوای تهویه‌ای که توسط سامانه‌ی هواساز در فصل زمستان تغذیه می‌شد، هزینه‌ی زیادی را متحمل می‌گردید. برای گرم‌کردن هوای ورودی، از آبی با دمای ۱۳۰ درجه‌ی فارنهایت (۵۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) استفاده می‌شد که توسط یک آب‌گرم‌کن که با بخار کار می‌کرد، تولید می‌گردید (بخار مورد نیاز خریداری می‌شد). در همان زمان، مقدار زیادی هوا از تخلیه‌ی سامانه‌ی هواساز هدر می‌رفت. علاوه بر این، برای برآورده کردن افزایش تقاضای سامانه‌ی تهویه‌ی مطبوع در تابستان، به یک چیلر جدید نیاز بود. آیا این نیازها را می‌شد به گونه‌ای برآورده کرد که بهره‌برداری از انرژی مصرفی HVAC در بیمارستان افزایش یابد؟

راه حل، استفاده از یک پمپ حرارتی آب به آب سانتریفوژ، ترکیبی بود که در ماه‌های گرم به‌عنوان چیلر و در ماه‌های سرد به‌عنوان پمپ حرارتی کار کند. در تابستان این واحد تنها با استفاده از یک کمپرسور فعال می‌تواند ۶۵۰ تن تبرید (۲۲۸۵ kW) را

جدول (۱) ارزش حرارتی و قیمت منابع مختلف انرژی

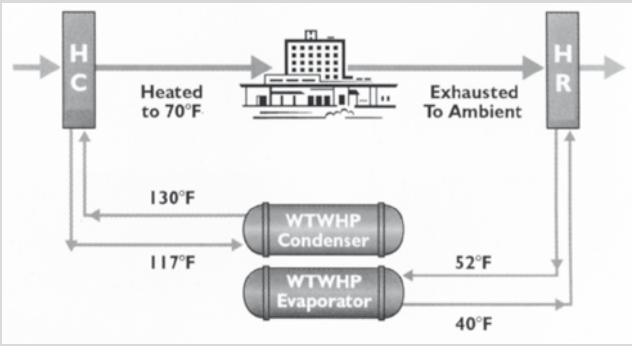
Energy Source	Heat Value	Cost of Source
Natural Gas	1,000 Btu/ft^3	$10.75/1,000 ft^3
No. 2 Fuel Oil	140,000 Btu/gallon	$1.79/gallon
Electric	3,415 Btu/kWh	$0.07/kWh

شکل (٤) طرحواره‌ی یک سامانه‌ی پمپ حرارتی آب به آب در یک بیمارستان در تگزاس

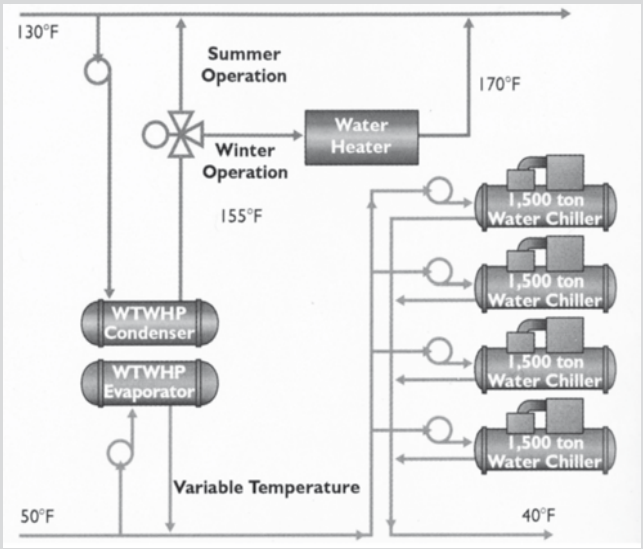


تامین کند. در زمستان، با استفاده از دو کمپرسور می‌توانند بیش از ۱۰,۰۰۰ MBtu/h (۲۹۳۰ kW) گرما در دمای ۱۳۰ درجه‌ی فارنهایت (۵۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) تولید کند. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، هوایی که از سامانه‌ی هواساز خارج می‌شود، از روی کویل‌های آبی که در کانال‌های تخلیه نصب شده‌اند، عبور می‌کند. این جریان هوا، آبی که از اواپراتور پمپ حرارتی می‌آید را از ۴۰ درجه به ۵۲ درجه‌ی فارنهایت (۴ به ۱۱ درجه‌ی سانتی‌گراد) می‌رساند. پمپ حرارتی، دمای حرارت را تا ۱۳۰ درجه‌ی فارنهایت (۵۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) افزایش می‌دهد. سپس آب کندانسور پمپ حرارتی به کویل‌هایی که در کانال‌های ورودی هواساز قرار داده شده‌اند، پمپ می‌شود و هوای تهویه‌ی ورودی را تا ۷۰ درجه‌ی فارنهایت (۲۱ درجه‌ی سانتی‌گراد) گرم می‌کند. این پمپ حرارتی آب به آب، نصب و راه‌اندازی شده و به صورت رضایت‌بخشی مشغول به کار است، ولی هنوز جزییات دقیق عملکرد آن در دسترس نیست. با این حال، یک تحلیل ساده‌ی اقتصادی نشان داده است که کاهش مصرف انرژی موجب خواهد شد که هزینه‌ی اولیه‌ی این پمپ حرارتی در مدت شش ماه جبران شود.

شکل (۵) طرحواره‌ی یک سامانه‌ی پمپ حرارتی آب به آب در بیمارستانی در اونتاریو



شکل (٦) طرحواره‌ی یک سامانه‌ی پمپ حرارتی آب به آب در بیمارستانی در ارکانزاس



کاربرد سوم -بیمارستانی در ارکانزاس

این بیمارستان تصمیم داشت با استفاده از یک پمپ حرارتی آب به آب سانتریفوژ مرکب، به طور هم زمان آب سرد مورد نیاز سامانه‌ی تهویه‌ی مطبوع و آب گرم مورد نیاز با دمای ۱۵۵ درجه‌ی فارنهایت (۶۸ درجه‌ی سانتی‌گراد) را تامین کرده و هزینه‌های گرمایش خود را کاهش دهد. همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، پمپ حرارتی آب به آب/چیلر در بالادست چیلرهای آب اختصاصی قرار گرفته است، در نتیجه این پمپ حرارتی می‌تواند دمای آب گرم خروجی را در ۱۵۵ درجه‌ی فارنهایت (۶۸ درجه‌ی سانتی‌گراد) کنترل کند، در حالی که دمای خروجی از اواپراتور بدون کنترل باقی می‌ماند. ولی از آنجایی که اواپراتور پمپ حرارتی آب به آب در بالادست چیلرهای آب اختصاصی می‌باشند، دمای خروجی از اواپراتور همان دمای ورودی به چیلرها می‌باشد. چیلرهای پایین دست، دمای آب خروجی خود را در ۴۰ درجه‌ی فارنهایت (۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) کنترل می‌کنند. از آنجایی که بیمارستان در زمستان به آب گرمی با دمای ۱۷۰ درجه‌ی فارنهایت (۷۷ درجه‌ی سانتی‌گراد) نیاز دارد، آب گرم خروجی از پمپ حرارتی با دمای ۱۵۵ درجه‌ی فارنهایت (۶۸ درجه‌ی سانتی‌گراد) به سمت یک آب‌گرم‌کن هدایت می‌شود و در آنجا با دمای ۱۷۰ درجه‌ی فارنهایت (۷۷ درجه‌ی سانتی‌گراد) وارد مدار گرمایش می‌گردد.

در تابستان که دمای ۱۷۰ درجه‌ی فارنهایت مورد نیاز نیست، آب خروجی از پمپ حرارتی با همان دمای ۱۵۵ درجه‌ی فارنهایت به‌طور مستقیم به مدار گرمایش فرستاده می‌شود. این پمپ حرارتی نیز هنوز نصب نشده است و در نتیجه اطلاعات عملکرد آن موجود نیست. ولی یک تحلیل اقتصادی ساده نشان داده است که کاهش مصرف انرژی موجب می‌شود که هزینه‌ی اضافی پمپ حرارتی ظرف مدت ۱۲ ماه جبران شود. علاوه بر سه کاربردی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، پمپ‌های حرارتی آب به آب مشابهی نیز در یک دانشگاه در تگزاس، یک کارخانه‌ی داروسازی در پورتوریکو و یک کارخانه‌ی تولید محصولات آلومینیومی در ایسلند در حال نصب می‌باشند.

جمع‌بندی

پمپ‌های حرارتی آب، به آب می‌توانند به شکلی اقتصادی، بهره‌برداری انرژی در سامانه‌های HVAC تاسیسات تجاری، صنعتی و اداری بزرگ را کاهش دهند. این تجهیزات می‌توانند حرارت با دمای قابل استفاده را با بازده بیشتری نسبت به آب‌گرم‌کن‌های سوخت فسیلی تولید کنند. تاسیساتی که هم اکنون نصب و راه‌اندازی شده‌اند، درستی این ایده را تایید می‌کنند.

References

1- 2004 ASHRAE Handbook-HVAC Systems and Equipment, Chapter 8.1.

2- 2004 ASHRAE Handbook-HVAC Systems and Equipment, Chapter 45.8.

3-ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.12004-, Energy Standard for Buildings Except Low- Rise Residential Buildings, Section 6.5.6, p.41.

4- Van Wylen, G.J. Thermodynamics. 1961. pp. 123124-.