خُنام ازخود نشده ما

که دل را نباشش خرد داد راه

دانشکده مهندسی مکانیک

بهینه سازی فنی- اقتصادی

بویلرهای بازیاب حرارت

امید حمیدخانی

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

استاد راهنما
دکتر سپهر صنایع

فروردین ۸۵

پژوهش حاضر با حمایت

سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور

انجام پذیرفته است.

چکیده

بویلرهای بازیاب حرارت یکی از مهم ترین بخش های سیکل های ترکیبی تولید توان و همچنین بخش اصلی واحدهای تولید توام می باشند. این سیستم ها دارای سه بخش مختلف هستند که در فرآیند بازیافت حرارت در آنها صورت می گیرد. این بخش ها عبارتند از اکونومایزر، اواپراتور و سوپرهیتر. بطور معمول بویلرهای بازیاب حرارت دارای حداکثر سه سطح فشار می باشند. هنگامی که گازهای داغ خروجی از توربین از بخش های مختلف بویلر بازیاب حرارت عبور می کند از طریق بازیافت حرارت (محتوای انرژی) موجود در آن، آب تبدیل به بخار می گردد که این بخار در سوپرهیتر به بخار سوپرهیت تبدیل می شود.

طبیعی است با توجه به اهمیت سیکل های ترکیبی و واحدهای تولید توام، طراحی بهینه بویلرهای بازیاب حرارت نیز مورد توجه ویژه طراحان سیستم های حرارتی و تولید توان قرار دارد. در پژوهش حاضر بویلرهای بازیاب حرارت از دیدگاه فنی- اقتصادی مورد تحلیل و بهینه سازی قرار گرفته اند. تابع هدف در نظر گرفته شده بصورت هزینه کلی تولید واحد اکسرژی در بویلر بازیاب تعریف شده است و متغیرهای تصمیم گیری انتخاب شده پس از انجام فرایند بهینه سازی بگونه ای تعیین شده اند که تابع هدف به حداقل مقدار خود برسد. بویلرهای بازیاب دو فشار، سه فشار و دارای گرم کن مجدد و احتراق اضافی بطور جداگانه مورد تحلیل و بهینه سازی قرار گرفته اند.

فهرست مطالب

مقدمه ۳

فصل اول ۸

بویلرهای بازیافت حرارت؛ ابزاری برای افزایش راندمان

۱-۱) انواع بویلرهای بازیاب حرارت ۹

۱-۱-۱) سیستم های یکبار گذر، گردش اجباری ۹

۱-۱-۲) سیستم های یکبار گذر، گردش اجباری و Spillover ۱۰

۱-۱-۳) سیستم های گردش اجباری ۱۱

۱-۱-۴) سیستم های گردش طبیعی ۱۲

۱-۲) بویلرهای بازیاب ؛ سطوح فشار و پارامترهای موثر در عملکرد ۱۵

۱-۳) بویلرهای بازیاب ؛ ملاحظات طراحی ۲۰

۱-۴) انتخاب مقادیر پینچ و Approach ۲۴

۱-۵) مدل سازی ۲۸

فصل دوم

تحلیل اکسرژی- اقتصادی؛ ارزیابی و بهینه سازی سیستم های انرژی ۳۹

۱-۲) بازگشت ناپذیری ۴۱

۲-۲) مفهوم اکسرژی ۴۳

۳-۲) انواع اکسرژی ۴۵

۴-۲) تحلیل اکسرژی ۵۰

۵-۲) تحلیل اکسرژی – اقتصادی یا ترمواکونومی ۵۹

۶-۲) بهینه سازی ترمو اکونومی کندانسور ۶۳

فصل سوم

بهینه سازی فنی-اقتصادی بویلرهای بازیافت حرارت ۶۶

۱-۳) اصول و مفروضات بهینه سازی ۶۷

۲-۳) بویلرهای بازیافت حرارت؛ بالانس اکسرژی و هزینه ها ۷۰

۳-۳) بهینه سازی فنی - اقتصادی بویلرهای بازیافت حرارت ۷۲

۴-۳) جمع بندی ۸۴

فصل چهارم

کد نرم افزاری و نتایج بهینه سازی ۸۶

۱-۴) ساختار کد نرم افزاری تهیه شده ۸۶

۱-۱-۴) مدل سازی ترمودینامیکی ۸۷

۲-۱-۴) محاسبات انتقال حرارت ۸۸

۳-۱-۴) محاسبات اقتصادی و تابع هدف ۸۹
۴-۱-۴) بهینه سازی ۹۰
الف-۴-۱-۴) جستجوی ساده ۹۰
ب-۴-۱-۴) الگوریتم ژنتیک **۹۱**
۵-۱-۴) بازخوانی خواص بخار آب ۹۴
۲-۴) نتایج مدل سازی ۹۵
۳-۴) نتایج بهینه سازی ۹۶
۱-۳-۴) بویلر بازیاب دو فشار با چیدمان A ۹۷
۲-۳-۴) بویلر بازیاب دو فشار با چیدمان B ۹۸
۳-۳-۴) مقایسه چیدمان های B و A ۹۹
۴-۳-۴) بویلر بازیاب سه فشار ۱۰۷
۵-۳-۴) بویلر بازیاب دو فشار با گرم کن مجدد ۱۰۸
۶-۳-۴) بویلر بازیاب دو فشار با احتراق اضافی ۱۰۹
۷-۳-۴) بررسی اثر قیمت واحد اکسرژی بر نتایج بهینه سازی ۱۰۹
۴-۴) جمع بندی و نتیجه گیری ۱۱۲
۵-۴) تحقیقات آتی ۱۱۴

مراجع ۱۱۶

فهرست اشکال

شماره شکل	عنوان	صفحه
۱-۱	شماتیک یک بویلر بازیاب گردش اجباری، یکبار گذر	۹
۱-۲	طرح شماتیک یک بویلر بازیاب گردش اجباری، Spillover	۱۰
۱-۳	شماتیک یک بویلر بازیاب گردش اجباری	۱۱
۱-۴	شماتیک یک بویلر بازیاب گردش طبیعی	۱۳
۱-۵	نمونه ای از واحدهای بازیاب حرارت	۱۴
۱-۶	نمونه ای از واحدهای بازیاب حرارت	۱۴
۱-۷	نمونه هایی از واحدهای بازیاب حرارت	۱۵
۱-۸	شماتیک و جدول مقایسه ای بویلرهای معمول و سیستم های بازیاب	۱۶
۱-۹	نمودار توزیع دما در یک بویلر بازیاب تک فشار	۱۷
۱-۱۰	نمودار توزیع دما در یک بویلر بازیاب دو فشار	۱۹
۱-۱۱	نمودار توزیع دما در یک بویلر بازیاب سه فشار	۲۰
۱-۱۲	نمودار توزیع دما در یک بویلر بازیاب تک فشار	۲۲
۱-۱۳	نمودار جریان و اجزا در بویلر بازیاب دو فشار (چیدمان A)	۲۹
۱-۱۴	نمودار جریان و اجزا در بویلر بازیاب دو فشار (چیدمان B)	۲۹
۱-۱۵	نمودار درختی چیدمان های مختلف یک بویلر بازیاب دو فشار	۳۱
۱-۱۶	نمودار جریان و اجزا در بویلر بازیاب با سه سطح فشار	۳۴

۱-۱۷	طرح شماتیک بویار بازیاب حرارت	۳۸
۲-۱	جریان اترژی و اکسرژی برای یک سیکل توانی	۴۵
۲-۲	شماتیک دستگاه ایده آل اکسرژی و نمودار مربوطه	۴۶
۲-۳	شماتیک دستگاه ایده آل اکسرژی فیزیکی	۴۷
۲-۴	نمودارهای مربوط به اکسرژی حرارتی	۵۵
۲-۵	محاسبه اکسرژی جرم کنترل	۵۶
۲-۶	محاسبه اکسرژی حجم کنترل	۵۸
۲-۷	بهینه سازی ترمواکونومی کندانسور	۶۵
۱-۳	نمودار بالانس اکسرژی در یک HRSG	۷۰
۲-۳	نمودار بالانس هزینه ها در یک HRSG	۷۱
۱-۴	مقایسه نتایج مدل سازی کد تهیه شده با نرم افزار Thermoflo	۹۶
۲-۴	تغییرات راندمان طرح بهینه با تغییر درجه حرارت ورودی گاز	۱۰۲
۳-۴	تغییرات هزینه طرح بهینه با تغییر درجه حرارت ورودی گاز	۱۰۳
۴-۴	تغییرات سطح فشار بالای طرح بهینه با تغییر درجه حرارت ورودی گاز	۱۰۴
۵-۴	تغییرات سطح فشار پایین طرح بهینه با تغییر درجه حرارت ورودی گاز	۱۰۵
۶-۴	تغییرات پینچ فشار بالای طرح بهینه با تغییر درجه حرارت ورودی گاز	۱۰۶
۷-۴	تغییرات پینچ فشار پایین طرح بهینه با تغییر درجه حرارت ورودی گاز	۱۰۶
۸-۴	تاثیر قیمت واحد اکسرژی بر راندمان طرح بهینه	۱۱۱
۹-۴	تاثیر قیمت واحد اکسرژی بر انتخا مقادیر پینچ	۱۱۲

فهرست جداول

شماره جدول	عنوان	صفحه
۱-۱	محدوده های توصیه شده برای انتخاب مقادیر Pinch و Approach	۲۶
۱-۳	مقادیر ضرایب انتقال حرارت کلی	۷۷
۳-۲	مقایسه مقادیر ضرایب انتقال حرارت در سوپرهیتر با روش های مختلف	۷۸
۳-۳	مقایسه اتلاف اکسرژی در سه نوع HRSG	۸۲
۳-۴	مقایسه نتایج حاصل از بهینه سازی در دو حالت مختلف	۸۳
۳-۵	نتایج حاصل از بهینه سازی فنی اقتصادی	۸۴
۴-۱	متغیرها و ثوابت کد مدل سازی	۸۸
۴-۲	ورودی ها و خروجی های نرم افزار	۹۵
۴-۳	انتخاب مقادیر ثابت	۹۷
۴-۴	نتایج بهینه سازی بویلر بازیاب دو فشار با چیدمان A	۹۸
۴-۵	نتایج بهینه سازی بویلر بازیاب دو فشار با چیدمان B	۹۹
۴-۶	مقایسه چیدمان های A و B	۱۰۰
۴-۷	نتایج بهینه سازی بویلر بازیاب سه فشار	۱۰۷
۴-۸	نتایج بهینه سازی بویلر بازیاب دو فشار با گرم کن مجدد	۱۰۸
۴-۹	نتایج بهینه سازی بویلر بازیاب دو فشار با احتراق اضافی	۱۰۹
۴-۱۰	بررسی اثر قیمت واحد اکسرژی در نتایج بهینه سازی	۱۱۰

مقدمه

راندمان مصرف انرژی خصوصا در سیستم هایی که از انرژی های محدود و تجدیدناپذیر استفاده می کنند، نکته ای بسیار حائز اهمیت است.

یکی از عمده ترین شاخه های ترمودینامیک مهندسی یافتن راهکارهایی برای افزایش راندمان و کارآیی سیستم های انرژی از منظر مصرف و یا تبدیل انرژی می باشد.

بدیهی است یکی از مهم ترین سیستم های انرژی، واحدهای تبدیل کننده انرژی حرارتی / شیمیایی به انرژی مکانیکی (کار / اکسرژی) می باشند. بنابراین این واحدها که تحت نام کلی نیروگاه های حرارتی طراحی و ساخته می شوند بسیار مورد توجه مهندسان علوم حرارتی می باشند.

شاید بتوان طرح Emmet در سال ۱۹۱۳ را اولین طرح پیشنهادی در خصوص سیکل های ترکیبی دانست. چند نمونه از این سیکل ها که ترکیبی از یک سیکل رانکین با سیال عامل آب و یک سیکل رانکین با سیال عامل جیوه بود توسط شرکت جنرال الکتریک در آمریکا ساخته شد.

در این موارد سیال عامل سیکل بالایی جیوه بود و در چاه حرارتی آن سیکل گرما را به منبع حرارتـی در سـیکل بخـار منـتقل می کرد. البته این طرح از نظر اقتصادی چندان توجیه پذیر نبود. پس از توسعه سیکل های گازی نیروگاه های ترکیبی بر پایه این سیکل ها طراحی و اجرا شد.

بـا یـک بررسـی اجمالـی در سیاسـتگذاری کشورهای مختلف در حوزه تولید توان الکتریکی مـشاهده مـی شـود که امروزه روند تصمیم گیری های کلان خصوصا در کشورهایی که دارای ذخایر فراوان سوخت های فسیلی هستند، بسمت استفاده از سیکلهای ترکیبی جهت گیری شده است. این موضوع بخوبی در مقالات ارایه شده در مجلات و کنفرانسهای اخیر قابل لمس است.

از آنجـا کـه ذخایـر انـرژی و سـوخت هـای فـسیلی در کشور ما نیز فراوان است و بخشی از سیاسـت هـای کـلان مدیریتی در حوزه تولید توان الکتریکی، استفاده از سیکلهای ترکیبی می باشد تحلیل و بهینه سازی این سیکلها می تواند در مصرف انرژی در سطح ملی بسیار تاثیر گذار باشد.

در ایـن پایـان نامـه بویلـرهای بازیافت حرارت که نقش بسیار مهمی در عملکرد نیروگاههای ترکیبـی دارنـد، از منظـر تحلـیل هـای فنی- اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته اند. سعی شده است ضـمن بررسی کارهای قبلی صورت گرفته در این خصوص، با استفاده از کد نرم افزاری تهیه شده در محـیط ویـژوال بیـسیک بویلـرهای بازیـاب حـرارت مورد تحلیل دقیق و بهینه سازی در حالت های گوناگون و با فرضیات مختلف قرار گیرند.

پایان نامه حاضر در چهار فصل گردآوری شده است.

بخش اول به شرح مختصری از بویلرهای بازیافت حرارت، انواع، اصول عملکرد و مدل سازی آنها می پردازد.

در بخش دوم ضمن بررسی مفهوم اکسرژی و کاربردهای آن در تحلیل سیستم های حرارتی، در مورد ارزیابی و بهینه سازی سیستم های حرارتی از منظر فنی- اقتصادی توضیحاتی ارایه شده است.

در بخش سوم نیز تاریخچه ای از تحقیقات صورت گرفته در سه چهار سال اخیر و اصول بهینه سازی فنی- اقتصادی بویلرهای بازیاب حرارت ارایه شده است.

در بخش چهارم و پایانی نیز ضمن تشریح ساختار و روش کار نرم افزار تهیه شده، نتایج حاصل از مدل سازی و بهینه سازی بویلرهای بازیاب حرارت از طریق اجرای نرم افزار مذکور مورد بررسی قرار گرفته است.

حاصل کار تحقیقاتی صورت گرفته در این پایان نامه پس از دست یابی به نیمی از اهداف از پیش تعیین شده، بصورت یک مقاله در مجموعه مقالات هفدهمین کنفرانس بین المللی ECOS 2005 (بهمراه ارایه شفاهی مقاله) چاپ گردید. پس از تکمیل مطالعات و فعالیت های مورد نظر و حصول نتایج نهایی، کلیه دستاوردهای تحقیقاتی در قالب مقاله دیگری جمع آوری گردیده است که در حال حاضر برای چاپ به ژورنال Applied Energy ارسال شده است و مراحل بررسی و داوری را می گذراند.

فصل اول:

بویلرهای بازیافت حرارت؛ ابزاری برای افزایش راندمان

مقدمه

توجه به راندمان حرارتی، روند طراحی نیروگاه ها را بسمت استفاده از سیستم های پیچیده تر با بازده بالاتر سوق داده است. یکی از طرح های بکار رفته در نیروگاه های حرارتی سیکل های ترکیبی است که از لحاظ بازده در بالاترین محدوده قرار دارند.

در طرح سیکل های ترکیبی مهمترین بخش، سیستمی است که نقطه اتصال سیکل گازی به سیکل بخار می باشد. این سیستم که بویلر بازیافت حرارت نام دارد، بمنظور بهره گیری از اکسرژی موجود در جریان گاز خروجی از توربین گاز طراحی می شود و تاثیر بسیار زیادی در راندمان کلی سیکل خواهد داشت. از اینرو بررسی، مدلسازی و در نهایت بهینه سازی این قسمت

بسیار مورد توجه است و می تواند نقش موثری در روند توسعه و پیشرفت ترمودینامیکی نیروگـاه هـا ایفا کند.

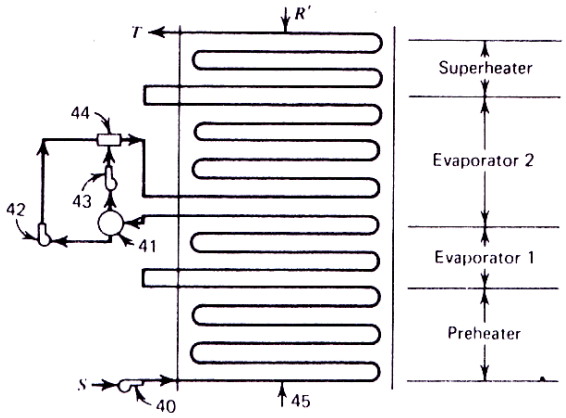
در این فصل بر بررسی انواع بویلرهای بازیاب، اصول حاکم بر عملکرد و پارامترهـای مـوثر در آن می پردازیم.

۱-۱) انواع بویلرهای بازیاب حرارت

سیستم های بویلر بازیاب حرارت در چهار دسته کلی طراحی و ساخته می شوند:

۱-۱-۱) سیستمهای یکبار گذر، گردش اجباری

در این سیستم ها تنها یک جریان عبور آب وجود دارد و اصولا درام وجـود نـدارد. آب پـس از ورود به یک لوله گرم می شود، تبخیر می شود و در همان مسیر لوله به حالت سوپرهیت در می آید. البته در این سیستم ها امکان استفاده از چند مسیر لوله جداگانـه بطـور مـوازی وجـود دارد. بیـشتر بویلرهایی که در شرایط فوق بحرانی کار می کنند، از این نوع سیستم ها استفاده می کنند. در شکل ۱-۱ طرح شماتیکی از این سیستم ها نشان داده شده است.

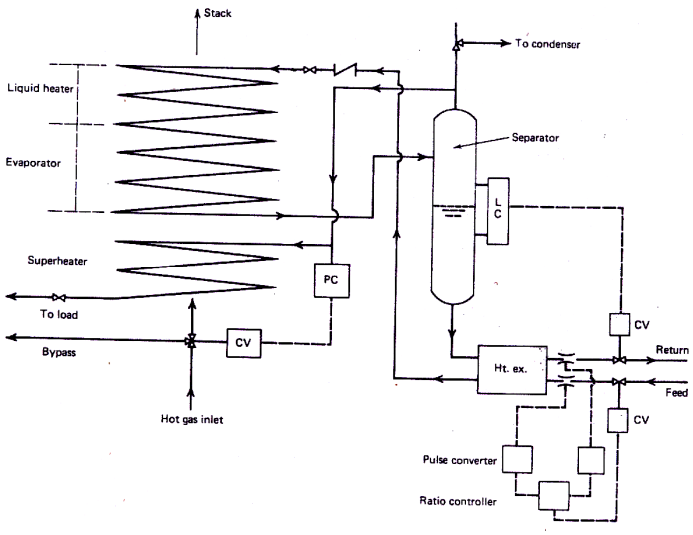


شکل ۱-۱: شماتیک یک بویلر بازیاب گردش اجباری، یکبار گذر

یکی از مسایل مهمی که باید در این سیستم ها بشدت مورد توجه قرار گیرد، موضـوع کنتـرل شرایط بخار خروجی است. در یکی از طرح هایی که برای این سیستم هـا وجـود دارد تمـامی آب از ورودی سیستم وارد نمی شود بلکه در حدود ۱۰ درصد آن در صورت نیاز در بخش انتهایی جریان (بخش سوپرهیت شدن بخار) به سیستم اضافه می شود و از این طریق می توان کنترل مناسـبی بـر روی شرایط بخار خروجی داشت.

۲-۱-۱) سیستم های یکبار گذر، گردش اجباری و Spillover

این سیستم ها فرم تغییر شکل یافته ای از سیستم های نوع اول هستند. در این سیستم ها بخار مرطوب (با کیفیتی در حدود ۹۰ درصد) از اواپراتور خارج می شود. پس از این مرحله رطوبت موجود در جریان خروجی از اواپراتور در یک جداکننده (Separator) جدا می شود. سـپس بخـار اشباع وارد سوپرهیتر می شود. طرح شماتیکی از این نوع سیستمها در شـکل زیـر نـشان داده شـده است.



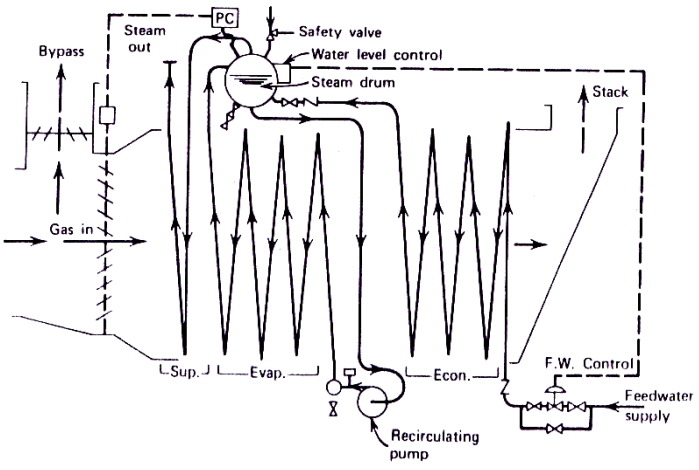
شکل ۲-۱: طرح شماتیک یک بویلر بازیاب گردش اجباری، spillover

یکی از مزایای این سیستم ها این است که حساسیت کمتری نسبت به کیفیت آب ورودی به سیستم دارد. در این سیستم ها ناخالصی های انحلال پذیر با رطوبت جدا شده در سپراتور از سیستم خارج می شود در صورتیکه در سیستم های نوع اول تمام ناخالصی ها وارد سوپرهیتر می شود. [۱]

۳-۱-۱) سیستم های گردش اجباری

در این سیستم ها جریان آب در درون بویلر از طریق پمپ هایی صورت می گیرد. یکی از نتایجی که استفاده از پمپ در بویلرها بهمراه دارد، کوچکتر شدن سایز لوله ها و در نتیجه کاهش اندازه و وزن کل سیستم است. در این مدل از بویلرها نیازی به طراحی لوله ها در حالت عمودی و یا شیب دار نیست و حتی می توان از چیدمان افقی برای لوله ها استفاده کرد.

شکل زیر طرحی شماتیک از یکی از ساده ترین سیستم های گردش اجباری را نشان می دهد.



شکل ۳-۱: شماتیک یک بویلر بازیاب گردش اجباری

همانطور که در شکل نشان داده شده است، بطور معمول یک بای پس در اکونومایزر تعبیه می شود تا از جوشیدن آب در این قسمت جلوگیری شود.

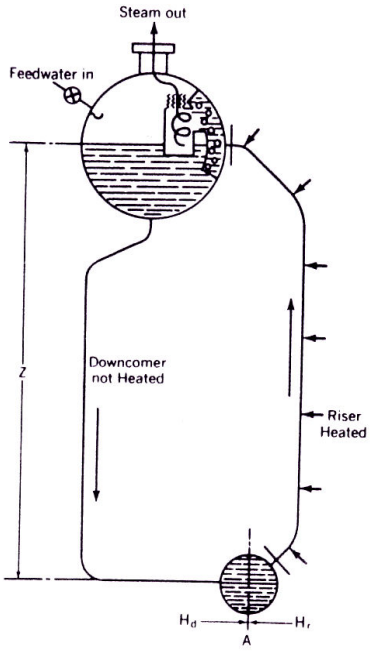
نکته حائز اهمیت اینکه عملکرد کلی سیستم حساسیت زیادی نسبت به رفتار پمپ دارد. بطوریکه اگر بهر علتی پمپ از کار بیفتد باید بلافاصله جریان گاز ورودی به بویلر قطع شود در غیر اینصورت به علت عدم جریان آب در درون لوله ها گرمای ناشی از عبور گاز داغ قطعا سبب آسیب دیدگی جدی لوله ها می شود. در برخی موارد یک درکنار پمپ اصلی از یک پمپ بصورت Stand by استفاده می شود.

در این سیستم ها برای کنترل دمای خروجی از سوپرهیتر و در واقع جلوگیری از افزایش بیش از حد آن از بخار اشباع بای پس شده از درام استفاده می شود. این بخار اشباع با بخار خروجی از سوپرهیتر مخلوط می شود و دمای بخار سوپرهیت شده را تا حد لازم پایین می آورد. [۱]

۴-۱-۱) سیستم های گردش طبیعی

در بویلرهای بازیاب بزرگ معمولا از یک سیستم گردش اجباری استفاده می شود. در این سیستم ها نرخ جریان سیال بطور خودبخود با افزایش حرارت ورودی تا رسیدن به یک حد ماکزیمم افزایش می یابد. در این سیستم ها تفاوت چگالی جریان در خطوط لوله پایین آورنده (down comer) و بالا برنده (raiser) سبب ایجاد جریان می شود.

برای طراحی این سیستم ها لازم است تحلیل دقیقی از میزان هد لازم برای بدست آمدن یک نرخ جریان مناسب صورت گیرد. برای محاسبه افت فشار در لوله ها و در واقع محاسبه هد لازم برای ایجاد گردش طبیعی سیال لازم است افت فشار ناشی از اصطکاک، افت ناشی از تغییر مقطع ورودی و خروجی و افت فشار در اثر خمیدگی های احتمالی در مسیر را در نظر گرفت. چنین محاسباتی باید با اندکی تغییر در مورد پایین آورنده ها نیز در نظر گرفته شود.



شکل ۴-۱: شماتیک یک بویلر بازیاب گردش طبیعی

نکته قابل توجه اینکه افزایش نرخ جرمی جریان سبب افزایش افت فشار ناشی از اصطکاک می شود. در نتیجه افزایش نرخ حرارت ورودی به سیستم از طرفی سبب افزایش تفاوت چگالی سیال در بالابرنده و پایین آورنده می شود و از طرف دیگر سبب افزایش افت فشار ناشی از اصطکاک می گردد. بنابراین در طراحی این سیستم ها باید توجه داشت که نقطه کارکرد سیستم در بخش صعودی نمودار تغییرات دبی جرمی با تغییرات نرخ حرارت ورودی به سیستم باشد.

بطور کلی از آنجا که افزایش فشار سبب افزایش چگالی گاز می شود، استفاده از سیستم های گردش طبیعی در بویلرهایی که در فشار بالای ۱۷,۵ مگاپاسکال کار می کنند چندان توصیه نمی شود. در صورت استفاده از گردش طبیعی در این سیستم ها لازم است اختلاف ارتفاع درام و هدر جمع کننده پایینی بیشتر در نظر گرفته شود. [۱]

شکل ۵-۱: نمونه ای از واحدهای بازیاب حرارت

شکل ۶-۱: نمونه ای از واحدهای بازیاب حرارت