

## بخار سوپرهیت چیست؟

در صورت تماس بخار اشباع تولید شده در دیگ با سطوح دمای بالاتر ، دمای بخار به بالاتر از دمای تبخیر افزایش خواهد یافت.

به این بخار ، بخار سوپرهیت گفته شده و به تفاوت دمای بخار اشباع و دمای افزایش یافته بخار درجه سوپرهیت اتلاق می گردد.

سوپرهیت نمودن بخار در صورت وجود آب درون بخار ممکن نبوده و افزایش حرارت موجب تبخیر قطرات آب خواهد شد . بمنظور گرمایش مجدد ، بخار اشباع باید از درون يك مبدل حرارتی عبور نماید . این مبدل می تواند قسمت ثانویه ای در داخل بویلر بوده و یا بصورت سوپرهیت جداگانه باشد. سیال گرم کن نیز می تواند گازهای داغ خروجی مشعل بوده و یا اینکه مشعل جداگانه ای تعبیه شود.

بخار سوپرهیت در کاربردهای خاصی استفاده می شود ، بعنوان مثال در توربین های بخار از بخار سوپرهیت جهت عبور از نازل ها و هدایت به سمت رتور استفاده شده که منجر به چرخش رتور می شود. از آنجائیکه انرژی لازم فقط از طریق بخار تامین می شود ، بنابراین بخار خروجی از رتور دارای انرژی کمتری خواهد بود.

در صورتیکه بخار در دمای اشباع باشد ، این کاهش انرژی منجر به کندانس قسمتی از بخار می شود.

توربینها دارای طبقات مختلفی هستند ، بخار خروجی از اولین قسمت به سمت محور رتور دوم هدایت می شود در واقع با هدایت بخار در طول طبقات توربین ، رطوبت آن افزایش پیدا خواهد نمود . این شرایط نه تنها باعث ایجاد ضربه چکش خواهد شد ، بلکه قطرات آب موجب خوردگی شدید پره های توربین می گردند . راه حل جلوگیری از این مشکلات ، استفاده از بخار سوپرهیت در ورودی توربین و استفاده از انرژی آن جهت چرخش رتور بوده که در نهایت بصورت بخار تقریباً اشباع از توربین خارج می شود.

علت دیگر استفاده از بخار سوپرهیت در توربینهای بخار ، افزایش راندمان حرارتی می باشد.

بازده ترمودینامیکی يك موتور حرارتی نظی ر توربین ، توسط دو تئوری زیر قابل محاسبه است:

-سیکل کارنو که در آن تغییرات دمای بخار خروجی و ورودی با دمای ورودی مقایسه می شود.

-سیکل رانکین که در آن تغییرات انرژی حرارتی بخار ورودی و خروجی با کل انرژی ورودی مقایسه می شود.

مثال 1 ، 3 ، 2:

بخار ورودی یک توربین ن در شرایط  $90^{\circ}\text{C}$   $bara/450$  باشد. بخار خروجی در فشار  $0.06$  (  $bara$  خلاء نسبی) بوده و دارای  $10\%$  رطوبت می باشد. دمای بخار اشباع  $36.2^{\circ}\text{C}$  است.

1 ، 1 ، 3 ، 2: بازده سیکل کارنو را محاسبه نمایید.

2 ، 1 ، 3 ، 2: بازده سیکل رانکین را محاسبه نمایید.

از آنجائیکه بخار دارای  $10\%$  رطوبت است بنابراین آنتالپی واقعی تبخیر برابر است با  $(2415 \times 0.9)$  و آنتالپی موجود در آب برابر  $(152 \times 0.1)$  می باشد.

با بررسی سیکل های مذکور نتایج زیر حاصل می شود:

-درجه حرارت یا انرژی ورودی به توربین باید تا حد امکان بالا باشد که بمعنی بالا بودن فشار دما بشرط عملی بودن آن است. استفاده از بخار سوپر هیت ساده ترین و مناسب ترین روش جهت این امر می باشد.

-درجه حرارت یا انرژی خروجی توربین حتی المقدور پایین نگاه داشته شود که بمعنی فشار و دمای حداقل عملی در این قسمت بوده و معمولاً توسط کندانسوز در خروجی توربین تامین می گردد.

با توجه به وجود  $10\%$  آب درون بخار ، مقدار انرژی واقعی بخار برابر  $90 h_{fg}$  % بوده و انرژی واقعی آب نیز  $10 h_f$  % می باشد.

-محاسبات مثالهای 1 ، 1 ، 3 ، 2 و 2 ، 1 ، 3 ، 2 بیان کننده راندمان ترمودینامیکی بوده و نباید با راندمان مکانیکی اشتباه گرفته شوند.

-اگر چه راندمانهای محاسبه شده بظاهر کم بنظر می آیند ، باید توجه نمود که نباید به تنهایی جهت راندمان کل سیستم فرض شوند و فقط جهت مقایسه انواع موتورهای حرارتی بطور مثال توربین گاز یا بخار و یا موتور دیزل استفاده می گردند.

-جداول بخار سوپر هیت

جداول بخار سوپر هیت نشان دهنده خواص بخار در فشارهای مختلف می باشند. با این وجود ، در بخار سوپر هیت رابطه مستقیمی بین فشار و دما وجود ندارد و در یک فشار خاص ، دماهای متفاوتی جهت بخار سوپر هیت قابل تعریف است. معمولاً جداول بخار اشباع با فشار نسبی و جداول بخار سوپر هیت با فشار مطلق درجه بندی می شوند.

مثال 2 ، 3 ، 2:

مقدار انرژی اضافی در بخار سوپرهیت با دمای  $400^{\circ}\text{C}$  و در فشار  $(0.1013 \text{ bara})$  نسبت به بخار اشباع در همان فشار را محاسبه کنید؟

این افزایش انرژی در نگاه اول مفید و قابل استفاده است ولی در واقع مهندسی را که می خواهند از این بخار در فرآیندهای گرما پشی استفاده کنند دچار مشکل می سازد. ظرفیت حرارتی مخصوص یا تقسیم انرژی سوپرهیت بر اختلاف دمای بین بخار اشباع و سوپرهیت بدست می آید:

برخلاف ظرفیت حرارتی ثابت آب ، این مقدار در بخار سوپرهیت با تغییر دما و فشار متغیر بوده و نمی تواند ثابت فرض شود . بنابراین عدد محاسبه شده  $2.0 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  فقط متوسط ظرفیت حرارتی مخصوص در محدوده دمای مشخص و برای فشار تعیین شده می باشد. رابطه مستقیمی بین فشار ، دما و ظرفیت حرارتی مخصوص در بخار سوپرهیت وجود ندارد.

- آیا می توان از بخار سوپرهیت در فرآیندهای انتقال حرارت استفاده نمود؟

اگرچه بخار سوپرهیت سیال ایده آلی در کاربردهای گرمایشی نیست ، با این وجود از این نوع بخار در سایت های صنعتی ، خصوصاً صنایع نفت و پتروشیمی استفاده می شود . در این موارد ، قبل از اینکه بگوئیم بخار سوپرهیت مزیت خاصی بر بخار اشباع جهت کاربرد حرارتی دارد ، باید توجه کرد که بخار سوپرهیت به علت استفاده در توربین های تولید نیرو مستقر در سایت ، موجود و در دسترس می باشد.

در اکثر مواقع از بخار اشباع جهت کاربردهای گرمایشی استفاده می شود ، حتی اگر مجبور به دی سوپرهیت کردن بخار باشیم . در بسیاری از سایت های پتروشیمی و پالایشگاهی نیز بخار سوپرهیت موجود تا حدود  $10$  درجه دی سوپرهیت شده و سپس جهت فرآیند گرمایش استفاده می شود . این مقدار ناچیز نیز در تماس با قسمتهای اولیه سطوح حرارتی منتقل می گردد . درجه های بالای بخار سوپرهیت غالباً مشکل ساز و غیراقتصادی بوده و بهتر است در کاربردهای گرمایش استفاده نشوند.

چند دلیل برای نامناسب بودن بخار سوپرهیت جهت گرمایش به شرح زیر است:

- مقدار آنتالپی بخش سوپرهیت بخار در مقایسه با آنتالپی اشباع آن نسبتاً کم می باشد. در صورتیکه بخار از درجه سوپرهیت کمی برخوردار باشد ، سرعت انرژی خود را از دست داده و به بخار اشباع تبدیل می شود و اگر درجه سوپرهیت بالا باشد ، زمان زیادی جهت خنک شدن تا دمای اشباع صرف شده و در این زمان نرخ انرژی منتقل شده کم می باشد.

- برخلاف بخار اشباع ، دمای بخار سوپرهیت یکنواخت نیست . بخار سوپرهیت هنگام پس دادن انرژی کاهش دما می یابد ، در حالیکه بخار اشباع با دارا بودن دمای ثابت ، تغییر فاز میدهد ، در نتیجه استفاده از بخار سوپرهیت ممکن است باعث گرادیان دما در سطوح

انتقال حرارت گردد. درمبدل های حرارتی ، استفاده از بخار سوپرهیت می تواند منجر به تشکیل لایه نازک خشک در حال جوشش در ناحیه جریان ثانویه گردد . این قسمت براحتی و به سرعت پوشیده از جرم ورسوب شده ومتعاقبا با افزایش دما در این ناحیه ، شکست وسوراخ شدن لوله ها رخ خواهد داد . درنتیجه دیده می شود که در کاربردهای انتقال حرارت ، بخار با درجه زیادی از سوپرهیت چندان مناسب نمی باشد ، زیرا:

-هنگام سردشدن تا دمای اشباع ، انرژی کمی را انتقال میدهد .

-باعث گراذیان دما در سطوح انتقال حرارت می گردد.

-سطوح انتقال حرارت بیشتری را نیازمند است.

نتیجه مذکور جهت بخار سوپرهیت کمی عجیب به نظر می رسد ، چرا که آهنگ انتقال حرارت در یک سطح ارتباط مستقیم با اختلاف دمای طرفین دارد . اگر بخار سوپرهیت دارای دمای بیشتری نسبت به بخار اشباع در یک فشار ثابت باشد ، آیا انتقال حرارت به همان نسبت افزایش می یابد؟ جواب نه می باشد که طبق جزئیات ذیل بیشتر به آن می پردازیم.

واضح است که افزایش دما باعث نرخ انتقال حرارت می گردد که در معادله 3 ، 5 ، 2 توضیح داده شده است:

معادله فوق همچنان نشان دهنده ارتباط نرخ انتقال حرارت به ضریب هدایت (U) و سطح انتقال حرارت (A) می باشد.

سطح انتقال حرارت ثابت بوده ولی میزان ضریب انتقال حرارت U بین بخار اشباع و بخار سوپرهیت متفاوت است.

ضریب انتقال حرارت کلی بخار سوپرهیت در طی فرآیند تغییر خواهد نمود ولی همواره از بخار اشباع کمتر می باشد. تخمین مقدار U در سوپرهیت مشکل است چرا که پارامترهای زیادی در آن تاثیرگذار هستند ، ولی در کل با افزایش درجه سوپرهیت مقدار U کاهش می یابد.

بطور مثال ، در یک کویل بخار افقی احاطه شده با آب مقدار U برای بخار سوپرهیت در حدود  $100-50 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  است که در مورد بخار اشباع به  $1200 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  افزایش پیدا می نماید.

شکل (2 ، 3 ، 2) همچنین در مورد کویل بخار درون مخزن روغن ، مقدار U جهت بخار سوپرهیت حدود

$20 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  و  $100 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  جهت بخار سوپرهیت و مقدار  $500 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  جهت بخار اشباع قابل انتظار است . اعداد مذکور تقریبی ونمونه بوده واعداد واقعی با توجه به ملاحظات طراحی وکارکرد متفاوت می باشند.

اگرچه دمای بخار سوپرهیت همیشه بالاتر از دمای بخار اشباع در يك فشار ثابت است ، قابلیت انتقال حرارت آن بسیار کمتر می باشد.

استفاده از معادله 3 ، 5 ، 2 جهت بخار سوپرهیت بسیار مشکل است زیرا دمای بخار در هنگام انتقال حرارت کاهش می یابد. اندازه گیری تجهیزات انتقال حرارت در بخار سوپرهیت نیز امری پیچیده است ، ولی واضح است که اندازه این تجهیزات نسبت به تجهیزات مشابه در بخار اشباع بزرگتر می باشد. شند زیرا دیده شد که بخار سوپرهیت ، معمولا در قسمتهای اولیه کویل کاهش درجه حرارت و خنک شدن بخار اشباع اتفاق می افتد. انتقال حرارت این قسمت در برابر حرارت بخار اشباع اندک است. پس بهتر است بخار سریعاً کاهش دما داده تا به بخار اشباع تبدیل شود (شکل 3 ، 3 ، 2). بدین منظور ، بخار سوپرهیت تجهیزات انتقال حرارت نباید بیشتر از 10C سوپرهیت باشد.

شکل 3 ، 3 ، 2: درجه سوپرهیت کم ، اجازه کندانس شدن بخار در قسمت بیشتر کویل و افزایش ضریب انتقال حرارت کلی را بدست می دهد.

در صورت استفاده از ترکیب فوق ، قسمت اول کویل صرف تبدیل بخار سوپرهیت به بخار اشباع شده و بقیه کویل مزیت استفاده از بخار اشباع را خواهد داشت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت عمومی کاهش چندانی نسبت به بخار اشباع نخواهد داشت.

از آزمایشات تجربی معلوم شده است که افزایش سطح مورد نیاز جهت هر 2°C از بخار سوپرهیت برابر 1% سطح کل است. استفاده از درجه سوپرهیت بیشتر از 10°C در کاربردهای حرارتی مناسب نیست ، زیرا باعث عدم تناسب و افزایش غیر اقتصادی سطوح انتقال حرارت ، افزایش احتمال رسوب و نیز احتمال جوشش و دمای ناخواسته در تولید می گردد.

#### Fouling-

فولینگ در واقع افزایش مقاومت حرارتی در سطوح ناقل حرارت بعثت تشکیل رسوب و ناخالصیهاست. بسیاری از سیالات می توانند در روی سطوح انتقال حرارت تولید رسوب و جرم نمایند. این فرآیند در دماهای بالاتر ، سریعتر اتفاق می افتد. بعلاوه از آنجائیکه بخار سوپرهیت گاز خشک است ، انتقال حرارت بخار به طرف دیواره فلزی باید از لایه ساکن مجاور دیواره عبور کند که خود مانع دیگری جهت انتقال حرارت است.

در بخار اشباع ، کندانس شدن بخار موجب حرکت بخار به طرف دیواره ها شده و درست در سطح مجاور دیواره مقادیر زیادی از انرژی نهان نهفته آزاد می شود.

ترکیب کلیه عوامل فوق باعث کاهش بسی از زیاد ضریب انتقال حرارت بخار سوپرهیت نسبت به بخار اشباع می باشد، اگرچه اختلاف دمای بین بخار سوپرهیت و سیال ثانویه بیشتر است.

-مثال 3 ، 3 ، 2 : اندازه گیری يك لوله جهت بخار سوپرهیت

بمنظور گرمایش يك مبدل حرارتي با قدرت 250 KW از بخار سوپر هیت در فشار از بخار سوپر هیت در فشار 3 barg و درجه سوپرهیت 10 (  $154^{\circ}\text{C}$  ) استفاده مي شود تا روغن را از دماي  $80^{\circ}\text{C}$  به دماي  $120^{\circ}\text{C}$  برساند. با استفاده از دماي متوسط ثانويه ( $rT_{Am}$ ) برابر  $100^{\circ}\text{C}$ ، سطح لازم جهت کویل انتقال حرارت را محاسبه نمائید:

(استفاده از متوسط اختلاف دماي ثانوي ه باعث ساده سازي شده و در واقع وبمنظور افزایش دقت متوسط دماي لگاریتمی باید مورد استفاده قرار گیرد.)

در ابتدا فرض کنید که کویل با استفاده از بخار اشباع 3 barg و دماي  $144^{\circ}\text{C}$  گرم مي شود. ضریب انتقال حرارت کویل بخار اشباع گرم کننده روغن با استفاده از جنس کربن استیل برابر  $500^{\circ}\text{C}/\text{m}^2\text{w}$  میباشد.

بنابراین در صورتیکه از بخار اشباع جهت گرمایش کویل استفاده شود سطح حرارتي لازم برابر با  $11.4\text{m}^2$  مي باشد.

درجه سوپرهیت بخار برابر  $10^{\circ}\text{C}$  مي باشد. با اعمال 1% افزایش سطح حرارتي بازا هر  $2^{\circ}\text{C}$  سوپرهیت ، مقدار افزایش سطح کویل برابر 5% خواهد بود:

با اضافه کردن 5% دیگر جهت رسوب گيري در آینده ( Foling Factor )

-کاربردهاي دیگر بخار سوپرهیت:

در مثال هاي فوق بخار سوپرهیت از داخل گذرگاه باریکی مثل لوله در مبدل پوسته لوله اي ویا بین صفحات ، در مبدل حرارتي صفحه اي عبور مي نماید.

در موارد دیگری مانند سيلن در هاي خشك كن در صنايع كاغذسازي ، ممکن است بخار سوپرهیت در حجم زیاد داخل سيلندر با سرعت کم استفاده شود. در این مثال بخار سوپرهیت نزدیک به جدار سيلندر سریعاً به دماي اشباع رسیده و کندانس مي شود و میزان انتقال حرارت با حالت استفاده از بخار اشباع یکسان مي باشد. (بخار سوپرهیت در قسمتهای میانی سيلندر باقی مي ماند.)

-تاثیر کاهش فشار

یکی از روش هاي تولید بخار سوپرهیت ، علاوه بر استفاده از مبدل حرارتي یا سوپرهیت ، استفاده از اریفیس یا شیر فشار شکن مي باشد. ولی باید توجه داشت که این عمل تنها در صورتیکه انرژی مازاد کافي جهت تبخیر رطوبت بخار ورودی به شیر فشار شکن و سپس افزایش دما وجود داشته باشد ممکن خواهد بود.

در عمل سوپرهیت شدن بخار در اثر تقلیل فشار در شرایط بسیار خشك بودن بخار ورودی یا در صورت تقلیل فشار زیاد ، اتفاق خواهد افتاد.

-مثال 4 ، 3 ، 2: افزایش خشکی بخار با استفاده از شیرکنترل:

بخار با ضریب خشکی 0.95 از شیر فشارشکن عبور کرده و از فشار 6 barg به 1 barg تقلیل فشار مییابد. شرایط بخار بعد از شیر را محاسبه کنید.

از جدول بخار اشباع با فشار barg:6

از جدول بخار اشباع با فشار barg:1

آنتالپی کل در فشار barg=6

این مقدار انرژی در هنگام گذر بخار از شیر فشار شکن ثابت خواهد ماند.

آنتالپی کل بخار در فشار 1 barg برابر است با:

از آنجایی که آنتالپی یا انرژی حاصل (2660.2 KJ/kg) کمتر از آنتالپی کل بخار اشباع در فشار 1 barg است ، بنابراین بخار سوپر هیت نشده و حاوی مقداری رطوبت خواهد بود.

مجدداً آنتالپی کل بخار در فشار 1 barg برابر است با:

-مثال 5 ، 3 ، 2: سوپر هیت ایجاد شده توسط شیر کنترل:

توسط یک شیر فشار شکن بخاری با ریب خشکی 0.98 از فشار 10 barg به فشار 1 barg ، تقلیل فشار داده می شود (شکل 4 ، 3 ، 2). درجه سوپر هیت بعد از شیر را محاسبه کنید.

از جدول بخار اشباع با فشار barg:10

همانند مثال 3 ، 3 ، 2 آنتالپی کل بخار خشک در فشار 1 barg برابر 706.7 kJ/kg است.

آنتالپی کل بخار خروجی از شیر بیشتر از آنتالپی کل اشباع در فشار 1 barg است و بنابراین نه تنها بخار کاملاً خشک خواهد بود ، کاملاً خشک خواهد بود ، بلکه تا حدی سوپر هیت می گردد.

این مقدار انرژی صرف افزایش دمای بخار با فشار 1 barg از دمای اشباع 120 °C به دمای 136 °C می گردد. (ارداگرام مولیر 5 ، 3 ، 2)

-دیاگرام مولیر:

درجه سوپر هیت با استفاده از جداول سوپر هیت یا نمودار مولیر قابل محاسبه است. (Sg)

شکل 5 ، 3 ، 2 نشان دهنده قسمت کوچک و ساده شده ای از دیاگرام مولیر است. دیاگرام مولیر نشان دهنده ارتباطات متعدد بین آنتالپی ، آنترپی ، دما ، فشار و ضریب خشکی است. در نظر اول بعلت خطوط زیاد نمودار ممکن است کمی پیچیده بنظر برسد.

-خطوط آنتالپی ثابت (افقی)

-خطوط آنترپی ثابت (عمودی)

-منحنی بخار اشباع که از وسط نمودار عبور می نماید ، دو ناحیه بخار مرطوب در پایین منحنی و بخار سوپرهیت در بالای منحنی را بوجود می آورد . منحنی اشباع نشان دهنده شرایط مختلف بخار اشباع خشک در فشارهای مختلف است.

-خطوط فشار ثابت در هر دو ناحیه

-خطوط دما ثابت در ناحیه سوپرهیت

-خطوط ضرایب خشکی بخار (x) در ناحیه مرطوب

فرآیند انبساط کامل نظیر توربینهای بخار ، فرآیند آنتروپی ثابت می باشد و توسط خطوط عمودی بین شرایط ورودی و خروجی بخار نشان داده می شود.

همچنین فرآیند اختلاف کامل (مثل شیرفشارشکن) فرآیند آنتروپی ثابت است . این فرآیند با خطوط افقی بین دو نقطه شرایط اولیه و ثانویه نشان داده می شود . هر دو فرآیند بالا نشان دهنده کاهش فشار می باشد ولی تفاوت در نحوه کار است . مثال های نشان داده شده در شکل 6 ، 3 ، 2 نشان دهنده ویژگی دیاگرام مولیر در آنالیز فرآیند بخار است . استفاده از جداول بخار سوپرهیت نیز روش دیگری جهت محاسبات است .

مثال 6 ، 3 ، 2 : انبساط کامل آیزنتروپیک

یک فرآیند انبساط ثابت بخار از درون توربین را در نظر بگیرید . فشار ورودی 50 bar با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  بوده و فشار خروجی 0.04 bara می باشد . از آنجائیکه فرآیند انبساط ثابت است ، آنتروپی ثابت خواهد بود و شرایط ثانویه با رسم خط عمودی در نمودار مولیر طبق شکل 7 ، 3 ، 2 می باشد . در شرایط اولیه ، آنتروپی تقریباً  $6.25 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  می باشد و در صورت ادامه خط آنتروپی ثابت ، آنتروپی نهایی در فشار 0.04 bara برابر  $1890 \text{ kJ/kg}$  و ضریب خشکی بخار حدود 0.72 می گردد . (شکل 7 ، 3 ، 2)

شرایط نهایی همچنین با استفاده از جداول بخار سوپرهیت قابل استخراج است :

در شرایط اولیه ( $300^{\circ}\text{C}$  ; 50 bar a) :

بخار خشک با فشار 0.04: bara

از آنجائیکه آنتروپی بخار اشباع در فشار 0.04 bara بیشتر از آنتروپی بخار سوپرهیت در فشار 50 bar a می باشد ، یعنی کندانس شدن قسمتی از بخار خشک اشباع جهت حفظ آنتروپی ثابت است . با توجه به ثابت ماندن آنتروپی ، شرایط نهایی بترتیب زیر محاسبه می شود :

این جواب تقریباً نزدیک به جواب حاصل از نمودار مولیر است و اختلاف کم موجود در نتیجه خطای قرائت نمودار می باشد .



مشهد بویلر (www.MBoiler.com)