چاپ در نشریه پیشگامان تبرید و تهویه مطبوع شماره ۲٤

افزایش بازدهی سامانه های تبرید با سابکولینگ

تهیه و تنظیم : مهندس سید رحیم آشناخواه

مایع مادون سرد یا سابکولینگ Super cooling

گاز فوق داغ با ورود به کندانسوردر **دما و فشار ثابت** تقطیر شده و به مایع مبرد تبدیل می شود.وقتی که تمام گاز تقطیر شد و دیگر هیچ گازی وجود نداشت، مایع مبرد که در دمای اشباع کندانسور قرار دارد به انتقال حرارت به هوا یا سیالی دیگری چون آب ادامه می دهد ، این امر باعث خنک شدن مایع مبرد می شود . این **اختلاف** بین دما مایع خارج شده از کندانسور و **دمای کندانسور** را سابکولینک می گویند. در حقیقت اگر مایع حاصل از تقطیر ، تا زیر دمای اشباع آن سرد شود ، این مایع را مادون سرد می گویند. بنابر این هر مایع در دمای پائین تر از دمای اشباع در فشار مربوطه را مایع مادون سرد می نامند.

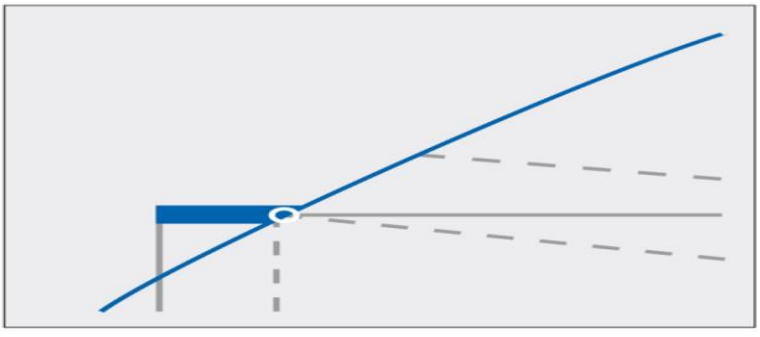
نکته: فقط مایع را می توان سابکول کرد. برای سابکول کردن مایع مبرد می بایست به ۱۰۰% نقطه اشباع مایع بدون وجود بخار رسید . بعد از این مرحله هر گونه از دست دادن دما باعث کاهش و از دست دادن گرمای **حساس مایع** اشباع می شود. عملیات سابکول در سیستم های برودتی فقط در قسمت انتهای کندانسور و خط مایع رخ می دهد.

هدف از سابکول کردن مایع مبرد

در خروجی از کندانسور در سیستم های برودتی معمولا مبرد را کمی ساب کولد می کنند تا پاشش مبرد در شیر انبساط و یا لوله موئین دچار مشکل نگردد و مبرد حتی امکان بصورت مایع وارد اواپرتورگردد. معمولا بعد از شیر انبساط ۲۰% گاز و ۸۰% مایع وجود دارد لذا هرچقدر مقدار مایع بعد از شیر انبساط بیشتر باشد بازدهی برودتی سیستم افزایش می یابد.

هدف های اصلی از سابکول :

- **سابكول يك امر ضروري جهت عدم ورود حباب مبرد به داخل شير انبساط است ، حباب هاي بخار مبرد باعث كاهش ظرفيت شير انبساط ، و در نتيجه كاهش ورود مايع مبرد به اواپرتور ميشود.**
- **ايجاد تضمين در عملكرد شير انبساط بر اساس مشخصات فنی آن**
- **جلوگيری از پديده كاويتاسيون در نشيمن شير انبساط**
- **افزايش استفاده از انتالپی تبخير**
- **استفاده از مبدل حرارتی داخلی**



Subcooling in log p, h diagram

***Figure 1**: Subcooling in log p, h diagram (detail)* شکل:1

می دانیم افزایش ظرفیت تبرید به کیلو وات (KW) را می توان با معادله زیر مطرح کرد.

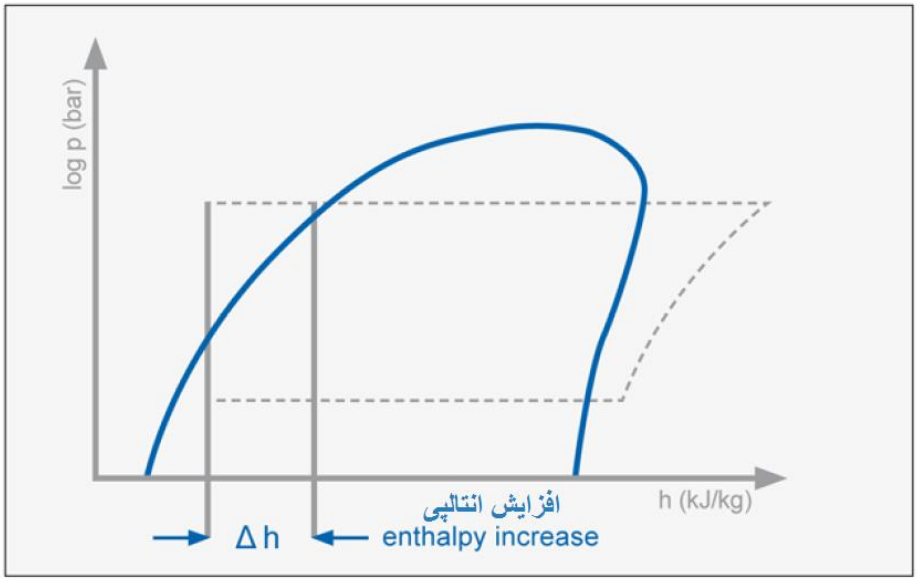
$$\Delta Q_o = m \ \Delta h$$

که در آن :

ΔQ_o = افزایش ظرفیت تبرید به Kw

m = میزان جرم جریان مبرد به Kg/s

Δh = افزایش انتالپی بعلت سابکولینگ Kj/kg

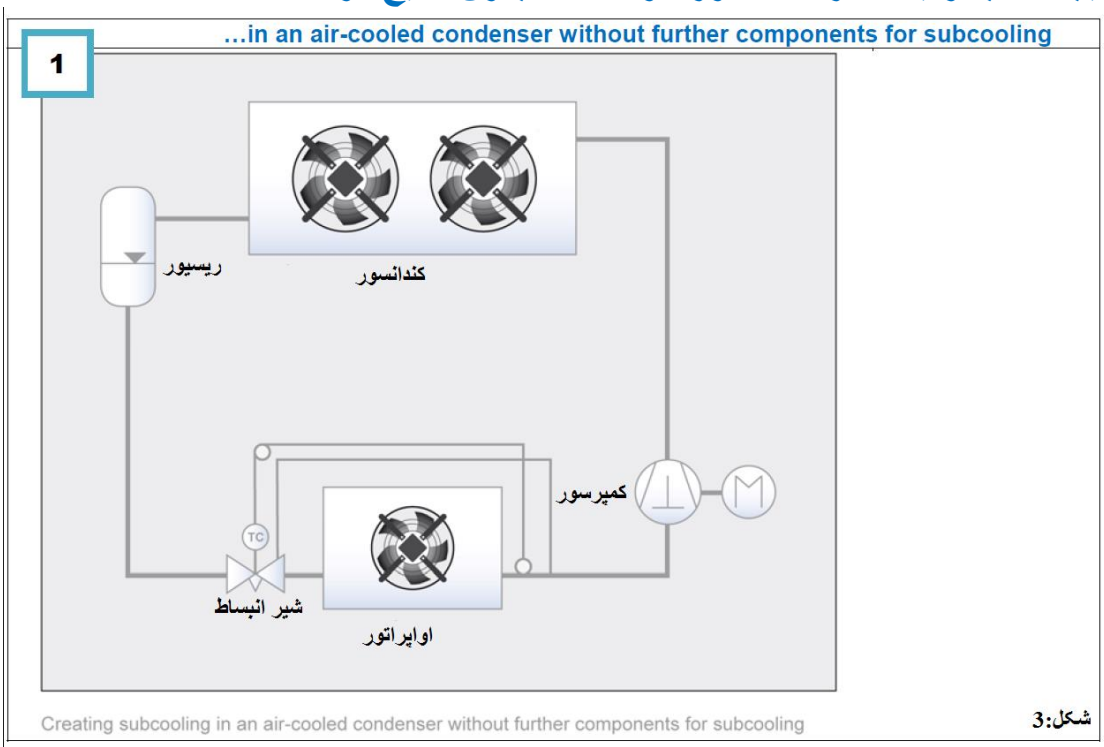


Enthalpy increase caused by sub cooling

Figure 2: *Enthalpy increase caused by subcooling* **شکل:2 افزایش انتالپی با سابکولینگ**

در این مقاله سعی در آشنا کردن هرچه بیشتر همکاران برودتی با روش های مختلف ایجاد سابکولینگ می باشم .

ایجاد سابکولینگ در کندانسور هوا خنک بدون هیچ گونه قطعات اضافه



Creating subcooling in an air-cooled condenser without further components for subcooling

شکل:3

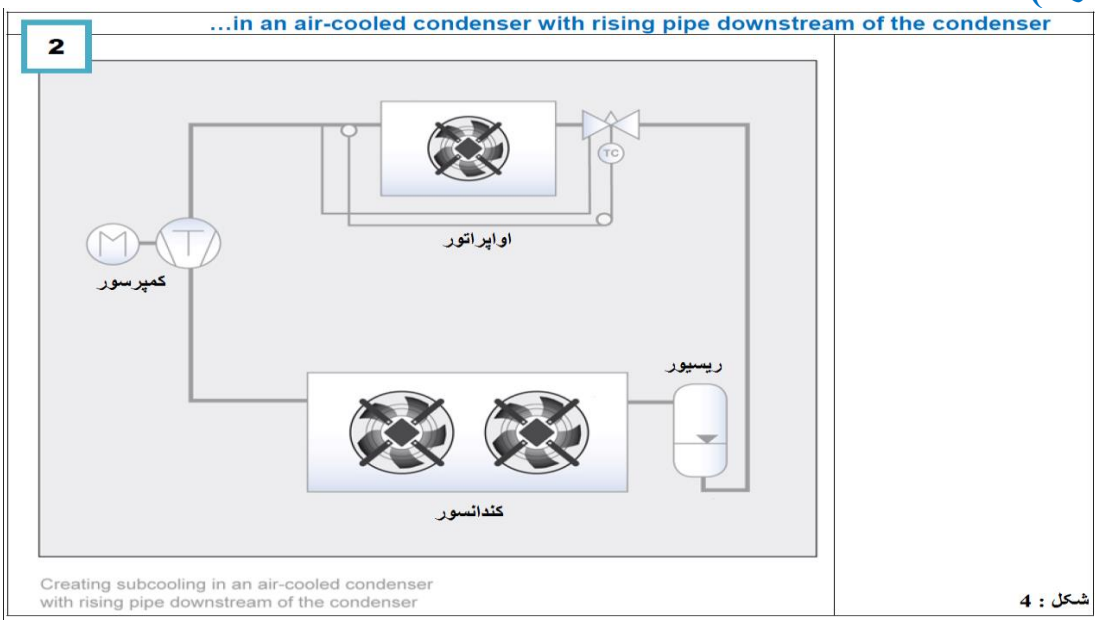
مزیت ها

- هیچ هزینه اضافه ای بر سامانه اعمال نمی کنند.
- هیچ نیاز به اضافه کردن قطعی اضافه در سامانه وجود ندارد

مضرات

- با کندانسور های استاندارد فقط می توان تا K ۱ سابکولینک دست یافت
- هیچ گونه کنترلی بر میزان سابکولینگ وجود ندارد
- از نظر ترمودینامیکی بعلت انتقال حرارت کم و سرعت پائین مبرد کارآیی ندارد

ایجاد سابکولینگ در کندانسور هوا خنک در شرایطی که لوله خروجی کندانسور بطرف بالا هدایت شده است.(کندانسور پائین تر از کمپرسور و اواپراتور قرار دارند)



مزیت ها

- سابکولینگ بیشتری می توان نسبت به نوع ۱ دست یافت
- هیچ هزینه اضافه ای بر سامانه اعمال نمی شود .
- هیچ نیاز به اضافه کردن قطعی اضافه در سامانه وجود ندارد

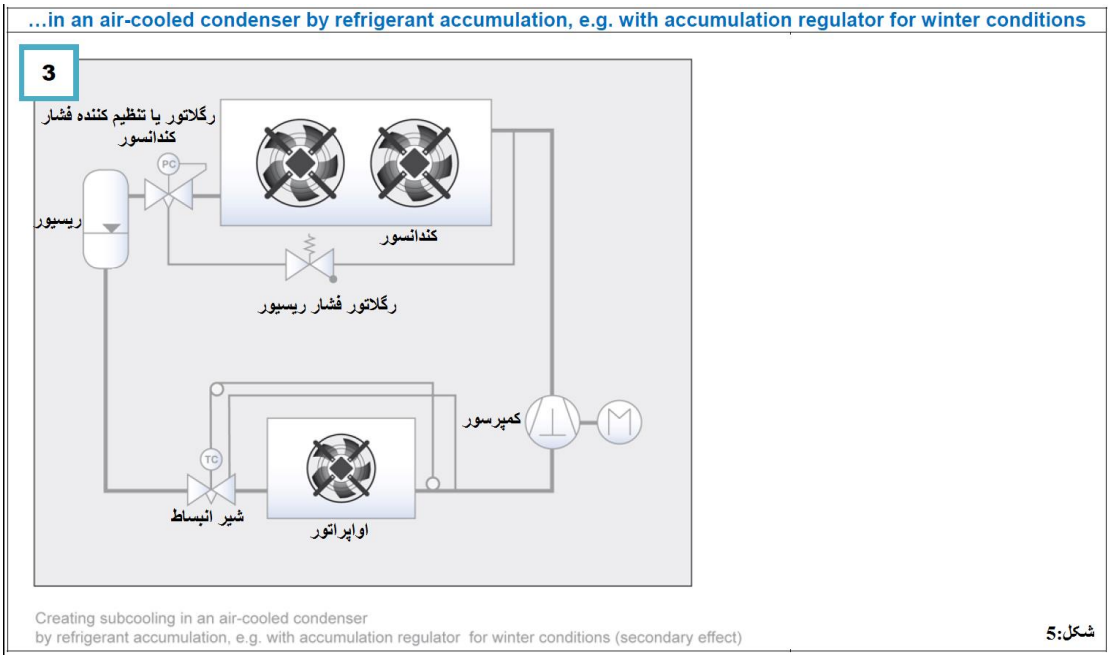
مضرات

- هیچ گونه کنترلی بر میزان سابکولینگ وجود ندارد
- افت فشار بستگی به ارتفاع دارد ، لذا بازدهی انرژی در این نوع کاهش می یابد.
- از نظر ترمودینامیکی بعلت انتقال حرارت کم و سرعت پائین مبرد کارآیی ندارد .
- کاهش بهینه استفاده کردن سطح کندانسور.
- بالا بردن ارتفاع ، یعنی افزایش افت فشار (جدول ۱) را ملاحظه کنید

	طول 10 m				
	پزیر آمدن لوله		افقی	بالا رفتن لوله	
اختلاف ارتفاع	-10 m	-5 m	+/- 0 m	+5 m	+10 m
افزایش(+) یا کاهش (-) سابکولینگ R404A	+1.8 K	+0.9 K	-0.1 K	-1.1 K	-2.1 K
R407C	+2.1 K	+1.0 K	-0.1 K	-1.2 K	-2.3 K
R134a	+4.3 K	+2.2 K	-0.2 K	-2.5 K	-5.2 K
R717	+1.5 K	+0.8 K	-0.2 K	-0.7 K	-1.5 K

جدول1 : افت فشار در خط مایع بعلت تغییرات ارتفاع در لوله 15 mm و ظرفیت برودتی Q = 10 Kw (اعداد تقریبی است)
(منبع Danven)

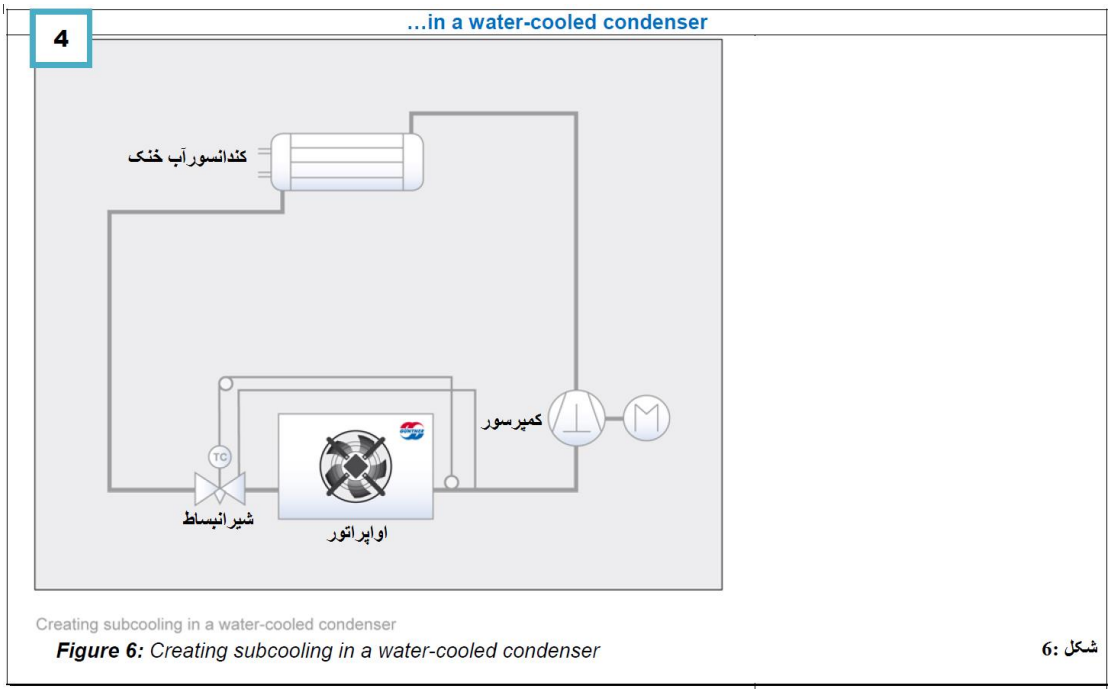
۵
ایجاد سابکولینگ در کندانسور هواخنک با اضافه کردن رگلاتور فشار در منبع ذخیره (ریسیور) و رگلاتور فشار کندانسور برای شرایط زمستان.



مزیت ها
- سابکولینگ بیشتری نسبت به نوع ۱ می توان دست یافت
- هزینه ای چندان به سامانه اعمال نمی شود .
- هیچ نیاز به اضافه کردن قطعی اضافه در سامانه وجود ندارد

مضرات
- هیچ گونه کنترلی بر میزان سابکولینگ وجود ندارد
- افت فشار بستگی به ارتفاع دارد ، لذا بازدهی انرژی در این نوع نیز کاهش می یابد
- از نظر ترمودینامیکی بعلت انتقال حرارت کم و سرعت پائین مبرد کارآیی ندارد
- هیچ اطمینانی درباره میزان سابکولینگ وجود ندارد
- کاهش بهینه استفاده کردن سطح کندانسور

ایجاد سابکولینگ در کندانسور آب خنک



Creating subcooling in a water-cooled condenser

Figure 6: *Creating subcooling in a water-cooled condenser*

شکل 6:

مزیت ها

- هزینه ها اولیه چندان افزایش نمی یابند.
- می توان از حرارت تولیدی درسامانه کندانسور در بازیافت انرژی استفاده کرد.
- میزان سابکولینگ در صورت ثابت بودن دمای آب ثابت خواهد ماند.

مضرات

- هزینه های کارکرد افزایش می یابد.
- آب خنک با دمای مناسب مورد نیاز است .

ایجاد سابکولینگ با استفاده از ریسیور عمودی

...in (vertical) receiver

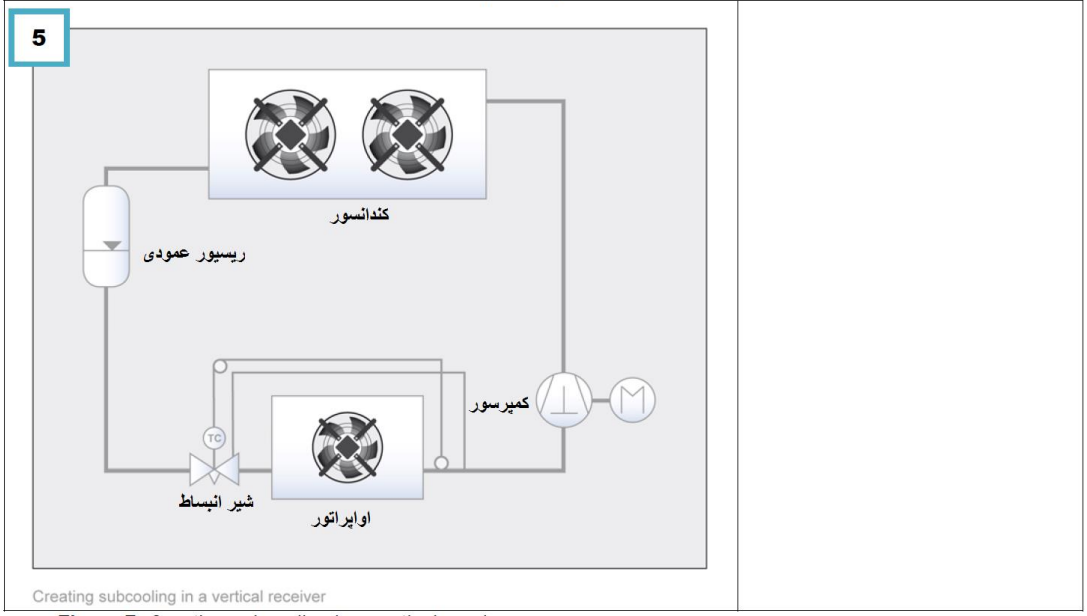


Figure 7: *Creating subcooling in a vertical receiver*

شکل:7

مزیت ها

- هزینه اضافی چندان در بر ندارد .

مضرات

- هیچ گونه کنترلی بر میزان سابکولینگ وجود ندارد
- میزان سابکولینگ بستگی به دمای محیط دارد .

ایجاد سابکولینگ در خط مایع و یا قطعات نصب شده در خط

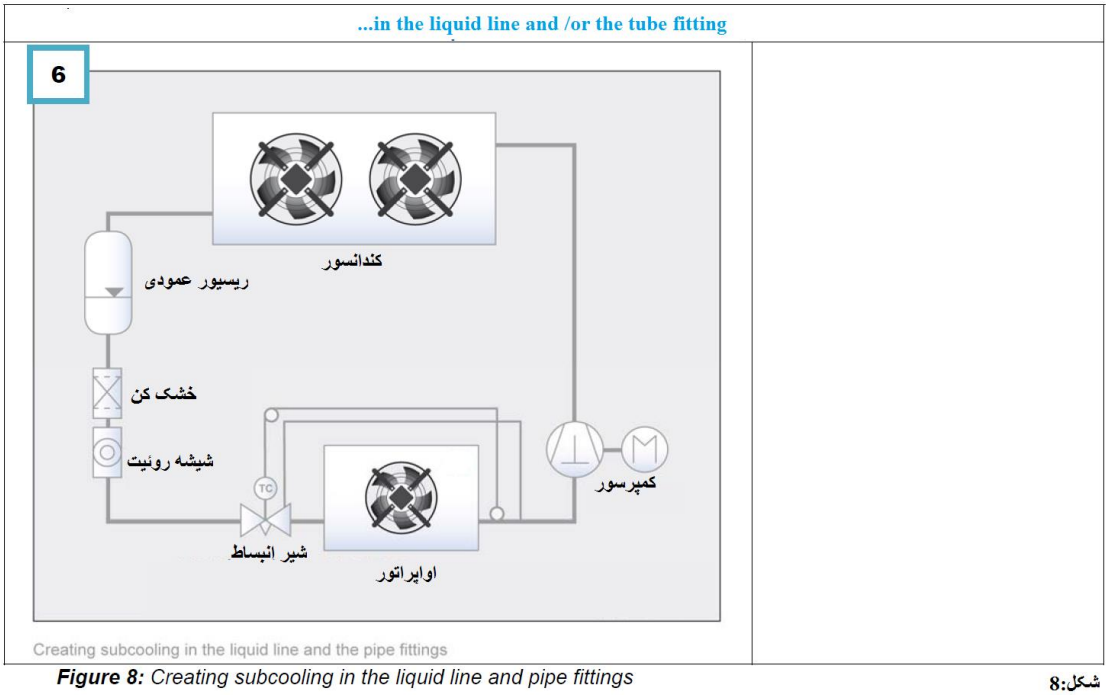


Figure 8: *Creating subcooling in the liquid line and pipe fittings*

شکل:8

مزیت ها

- هزینه ای اضافه در بر ندارد.
- میزان سابکولینگ با افزایش طول لوله افقی و یا هدایت آن بطرف پائین افزایش می یابد $t_{محیط} < t_{مبرد}$.

مضرات

- کنترلی بر میزان سابکولینگ وجود ندارد.
- سابکولینگ می بایست قبل از افت فشار قابل ملاحظه در خط مایع رخ دهد مگر نه وقوع فلاشینگ مبرد و یا احتمال چگالش در خط وجود دارد .

ایجاد سابکولینگ در کندانسور های هواخنک و با یک کوئل خنک کننده مجزا.

سابکولینگ در کوئل خنک کننده → ریسیور→ کندانسور : ترتیب قطعات

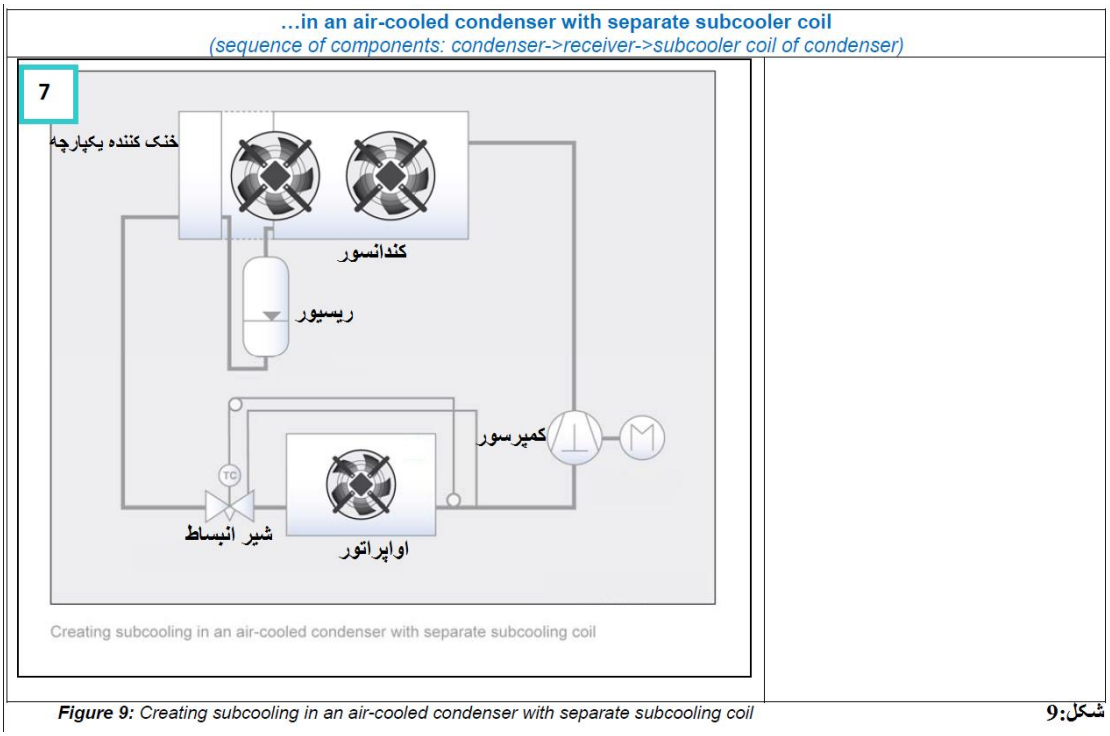


Figure 9: *Creating subcooling in an air-cooled condenser with separate subcooling coil*

شکل:9

مزیت ها

- سابکولینگ بیشتری نسبت به نوع ۱ می توان دست یافت

$$\Delta t = t_c - t_{L1}$$

مثال $\Delta t = 12\ k \rightarrow \Delta t_u = 10K$

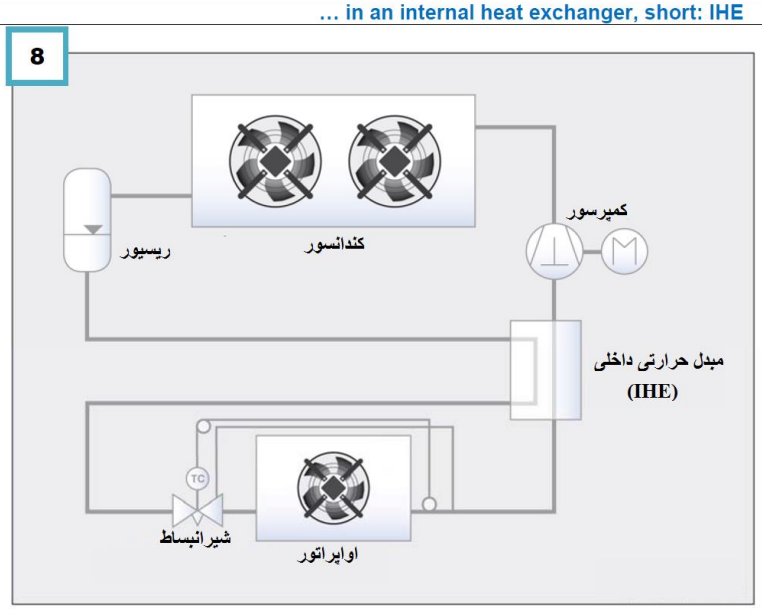
- میزان سابکولینگ در صورت ثابت بودن دمای آب ثابت خواهد ماند.

مضرات

- هزینه ها نصب افزایش می یابد.
- هزینه های کندانسور بعلت وجود مدار دوم افزایش می یابد.
- در دماهای پائین محیط ، ناخواسته به سابکولینگ بیش از اندازه می رسیم .

ایجاد سابکولینگ با مبدل حرارتی داخلی

... in an internal heat exchanger, short: IHE



Creating subcooling in the internal heat exchanger (IHE)

شکل:10

مزیت ها

- استفاده از مبدل حرارتی باعث افزایش میزان سابکولینگ و سوپر هیت شدن گاز مکش می شود ، این امر باعث:
  - افزایش خیلی کم هزینه ها اولیه می شود.
  - محافظت کمپرسور در مقابل برگشت احتمالی مایع مبرد افزایش می یابد.

مضرات

- کنترلی بر میزان سابکولینگ وجود ندارد.
- نا مشخص بودن مقدار سابکولینگ ، اما این مقدار را می توان با مشخص شدن نقطه کارکرد سامانه محاسبه کرد.
- هزینه نصب مقداری مقداری افزایش می یابد.
- برای مبرد های با توان آیزنتروپیک بالاتر ازعدد ۱ ، مثل R717 مناسب نیست
- برای این نوع مبرد ها ریسک پخته شدن روغن در دماهای بالای سوپر هیت افزایش می یابد.
- در سامانه های دما پائین ، افت فشار قابل ملاحظه ای در خط مکش مشاهده می شود.

ایجاد سابکولینک با استفاده از خنک کننده هوا خنک بصورت مجزا

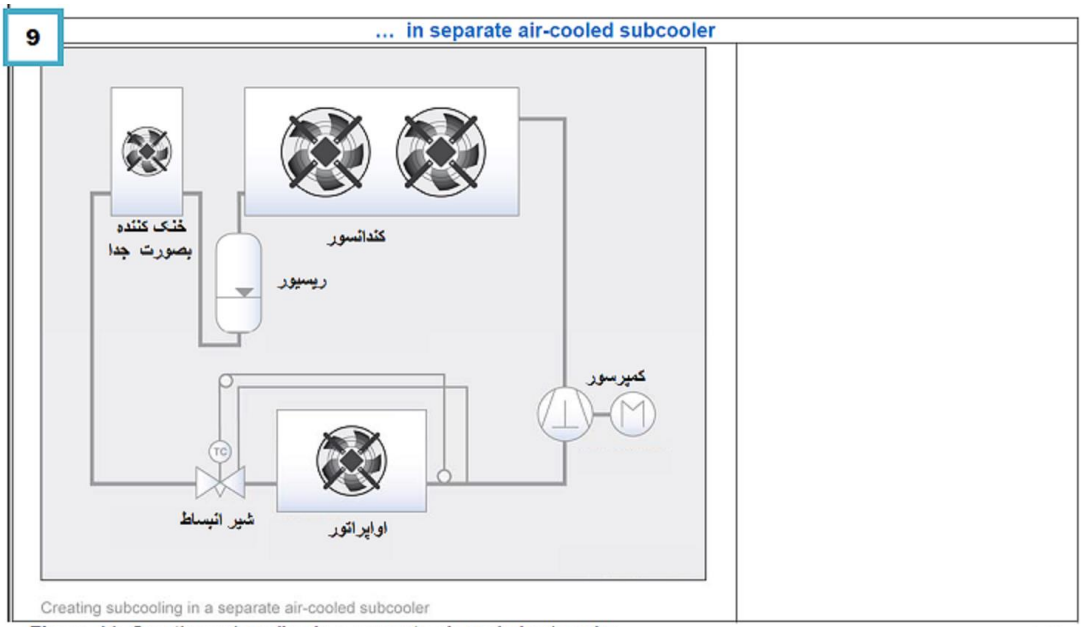


Figure 11: *Creating subcooling in a separate air-cooled subcooler*

شکل:11

مزیت ها

- سابکولینگ هدفمند امکان پذیر است.
- تقریبا وابستگی به دمای محیط ندارد .
- تقریبا می توان به کارکرد ثابتی در تمام قطعات نصب شده در خط مایع دست یافت .
- می توان تا ۱۰K سابکولینگ دست یافت.

مضرات

- بعلت اضافه شدن خنک کننده ، هزینه اولیه افزایش می یابد.
- محدودیت تقریبی ۲K بالاتر از دما محیط .

ایجاد سابکولینگ با نصب مجزا کندانسور آب خنک

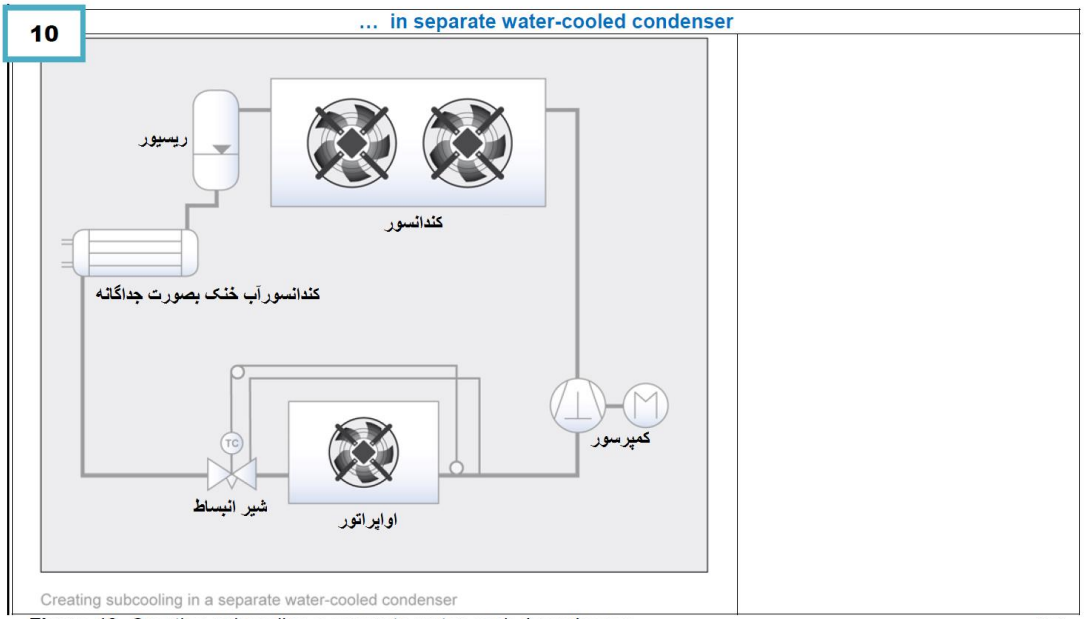


Figure 12: *Creating subcooling a separate water-cooled condenser*

شکل:12

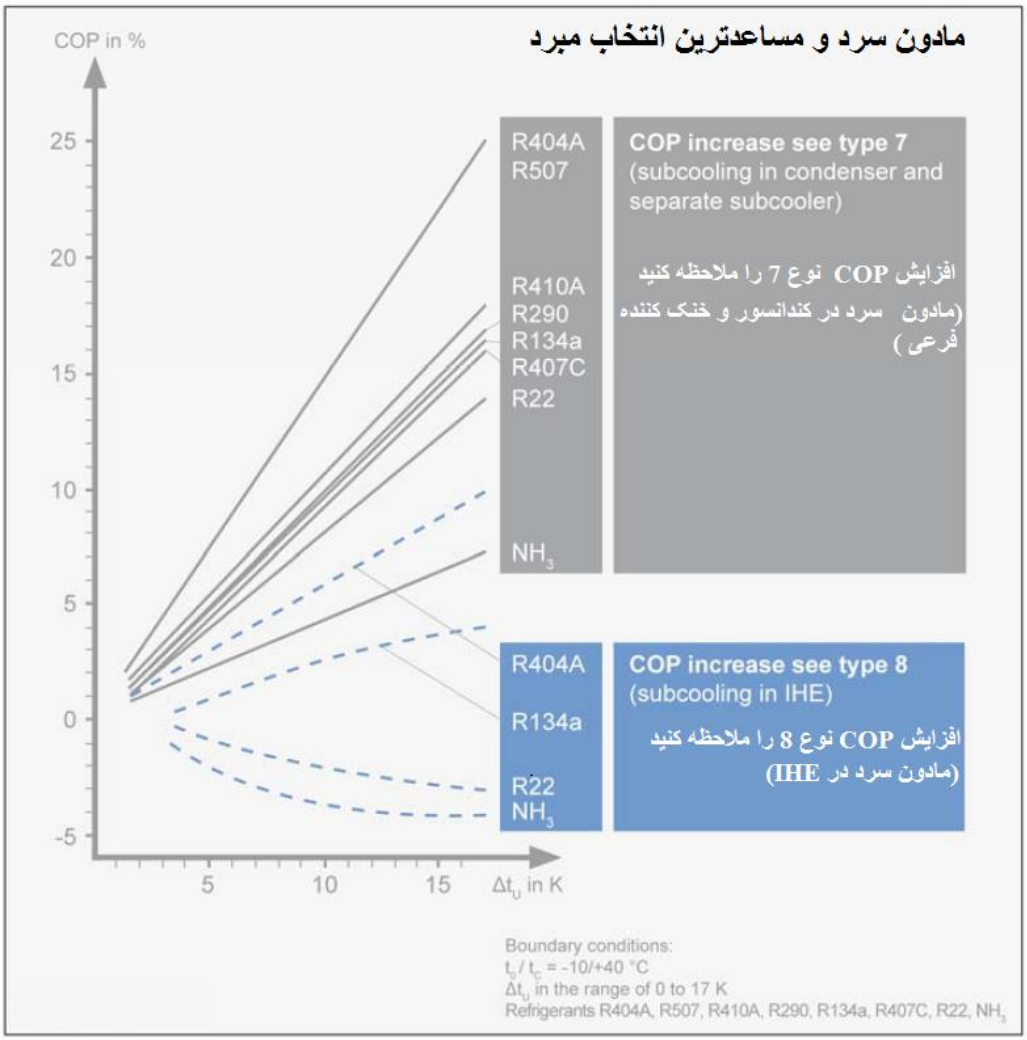
مزیت ها

- سابکولینگ هدفمند امکان پذیر است.
- دمای محیط هیچ تاثیری ندارد.
- فقط بستگی به شرایط آب خنک دارد .
- در صورت نیاز می توان از بازیافت حرارتی آن استفاده کرد.

مضرات

- مصرف قابل ملاحظه آب .
- افزایش هزینه مبدل حرارتی و لوله کشی .

مقیاس تاثیرات مادون سرد در مبردهای مختلف
تاثیرات مادون سرد مبرد در بازدهی سامانه ، در صورتکه صحیح انجام شود.



Subcooling and optimal refrigerant selection

شکل13 :

مقایسه: تاثیرات سابکولینگ در مبردهای مختلف
Comparison: Influence of subcooling with different refrigerants

مبرد Refrigerant	توان آیزنتروپیک Isentropic exponent K*	انتالپی تبخیر Evaporation enthalpy R* / kJ/kg	دما دهش کمپرسور Compressor discharge temperature t_0** / °C	تناسب در سابکولینگ Suitability for subcooling see type 7 نوع 7 را ملاحظه کنید	see type 8 نوع 8 را ملاحظه کنید
R404A / R507	1.02	168.3	≈ 70	++	++
R134a	1.06	198.8	≈ 77	+	–
R407C	1.09	214.0	≈ 85	+	–
R410A	1.10	222.5	≈ 90	+	–
R22	1.14	202.2	≈100	+	–
R290 (Propane)	1.07	374.5	≈ 75	+	–
R717 (NH_3)	1.29	1262.2	≈165	-	–
R723 (NH_3/DME)	…	913.4	≈140	+	–

* at t = 0 °C
Data acc. to Solvay Fluor GmbH

** at t_0 / t_C / t_{0h} = -10 / +40 / +5
Open piston compressor
Compressor head uncooled

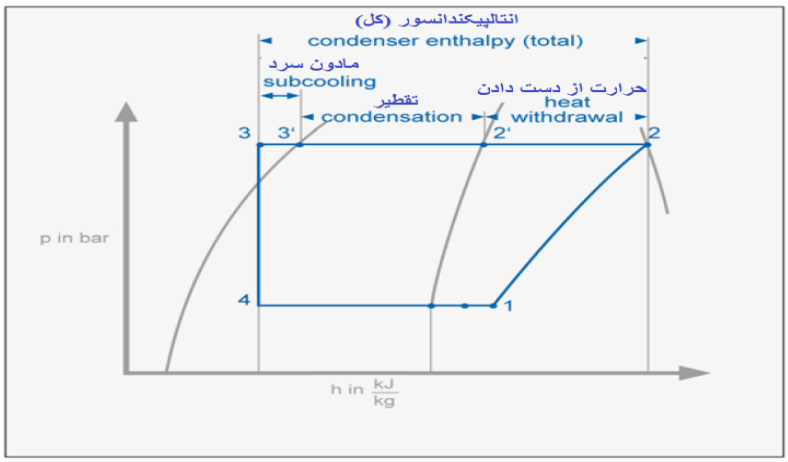
++ کاملا مناسب
\+ کمی مناسب
– مناسب نیست

مادون سرد در کندانسور های هوا خنک

Thesis تز

در کندانسورهای هوا خنک می توان به سابکولینگ قابل ملاحظه ای دست یافت.
البته این امر بستگی به سه عامل انتقال انرژی

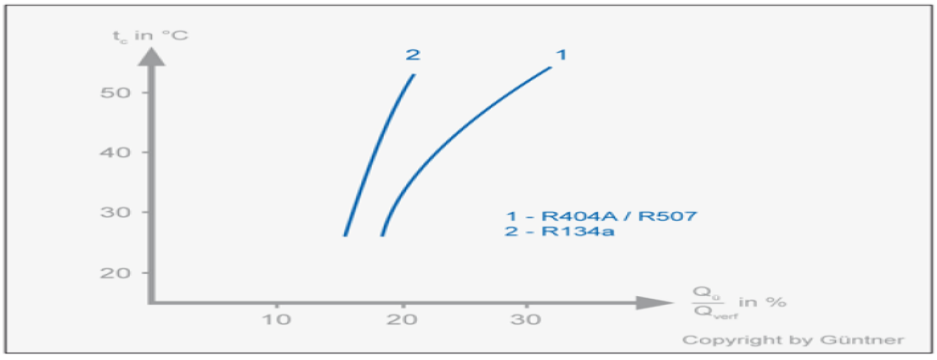
۱- از دست دادن گرمای گاز داغ Dissipation of hot heat
۲- تقطیر مبرد Condensation of Refrigerant
۳- سابکولینگ مایع مبرد Subcooling of Liquid Refrigrant
دارد.



Representation of the three phases of a condenser in a log p, h diagram

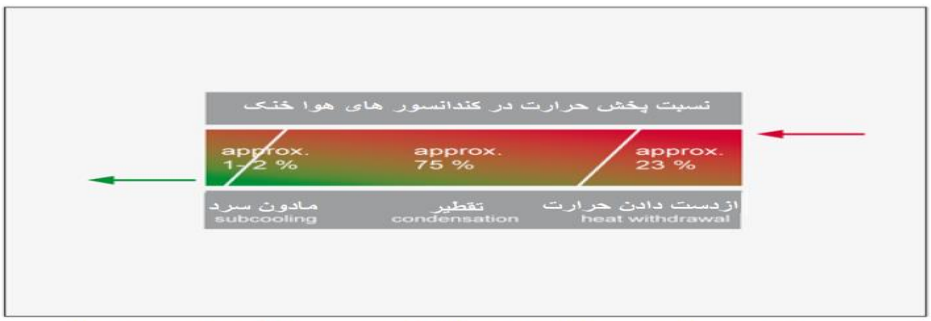
شکل14 :
***Figure 14**: Representation of the three phases of a condenser in a log p, h diagram*

قابل ذکر است میزان سابکولینگ در کندانسورهای استاندارد پائین است . می دانیم برای مادون سرد کردن مبرد ، شرایط فازی آن می بایست کاملا مایع بدون وجود هر گونه گاز باشد. اگر مبرد در خروجی کندانسور تبدیل به مایع نشود ، این امر باعث کاهش مادون سرد شدن مبرد می گردد و در عمل این میزان کمتر از ۱ K خواهد بود. بزرگ یا خیلی بزرگ در نظر گرفتن کندانسور در حقیقت به معنی رسیدن به سابکولینگ زیاد نیست ، بلکه این امر باعث فقط باعث کاهش فشار تقطیر می گردد. اگرچه این امر خود باعث کاهش هزینه های انرژی می شود ولی مستقیم به سابکولینگ بستگی ندارد. کار اصلی کندانسور ایجاد تقطیریعنی تغییر فاز دادن گاز به مایع می باشد. بخاطر همین مطلب در ابتدای امر می بایست به انتقال قابل ملاحظه دما در حالت سوپر هیت به محیط اقدام کرد(یعنی Desuperheating) . این سطح از کندانسور برای انتقال حرارت در شرایط سوپر هیت تقریبا ۵ % (برای گاز R134a در دمای t_c=25 ° C)، ۱۵ % (برای گاز R404 در دمای t_c= 50 ° C) و برای آمونیاک تا ۲۰ % می تواند باشد. مابقی سطح برای تقطیر گاز مبرد استفاده می شود و این سطح غیر مسقیم بستگی به دمای تقطیر دارد . این سطح تقریبا ۹۳ % (برای گاز R134a در دمای t_c=25 ° C)، ۸۲ % (برای گاز R404 در دمای t_c= 50 ° C) می باشد. لذا می توان نتیجه گرفت نسبت موثر سابکولینگ در کندانسور خیلی پائین است و این میزان ۱/۵ % (برای گاز R134a در دمای t_c=25 ° C)، ۳/۵ % (برای گاز R404 در دمای t_c= 50 ° C) و برای آمونیاک کمتر از ۱ % می باشد.این ارتباط را می توانید در نمودار زیر ملاحظه کنید.



Percentage of superheating energy to condensation heat

شکل15 : درصد انرژی سوپر هیت به گرمای کندانس



شکل 16 : نسبت پخش حرارت در کندانسور هوا خنک (مبرد R 404 در $t_c \sim 40$ °C

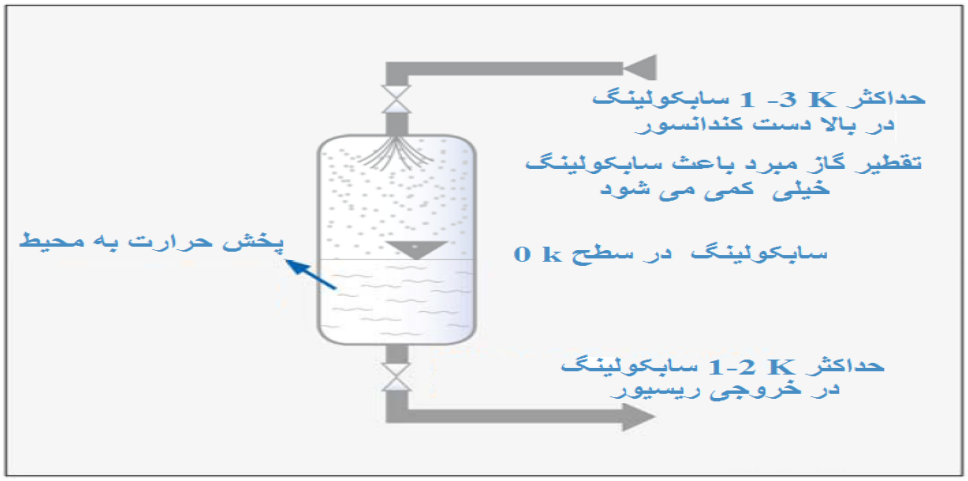
مادون سرد کردن از کندانسور تا خروجی لوله ریسیور

تز Thesis

همانطور که قبلا بدان اشاره داشیم عمل سابکولینگ بسختی درکندانسور انجام می شود ، ولی این کار را می توان براحتی با ایجاد بالشتگ گاز(Gas Cushion) در ریسیور انجام داد. این یک گفته و یک تئوری است ، اما اگر درست باشد ، این یعنی اینکه بسیار از سامانه های برودتی بعلت عدم وجود ریسیور درست کار نمی کنند. ولی همه ما می دانیم در مخزن بسته ما نمی توانیم مبرد را خوب مادون سرد کنیم (استاتیک = Refrigerant Bottle) مگر اینکه کاملا ۱۰۰ % پرُ باشد. اجازه دهید برای درک بهتر شرایط زیر را در نظر بگیریم .

مبرد ی که فقط ۱ k مادون سرد شده است کندانسور را ترک می کند، مسیر خط تقطیر بعلت کوچک بودن سطح مقطع لوله های کندانسور بسیار سخت است . بعلت کوچک بودن سطح مقطع لوله و همچنین تغییرات **بار(Load)** در سامانه (برای زمانی کوتاه در نظر می گیریم که میزان مایع مبرد بیشتر از نیاز نقطه بار برودتی است) این امر ممکن است باعث اختلال و برگشت دوباره گاز به کندانسور گردد. در عمل این پدیده را می توان در صورت وجود شیشه رویت بر روی مخزنهای بزرگ مشاهده کرد. حالا فرض را بر این می گذاریم که مایع مبردی که خیلی کم در کندانسور مادون سرد شده وارد ریسیور می شود ، در این شرایط بعلت حجم بزرگ ریسیور ما شاهد حداقل افت فشار هستیم و همین امر باعث می شود دمای مایع مبرد کمی کمتر از دمای گاز در ریسیور گردد. در هنگام گذر مبرد از گاز اشباع ، قسمتی کمی ازمبرد خیلی **کم مادون سرد** می شود. در این هنگام این گذر سابکولینگ تقریبا معکوس می شود. یکی از فاکتور مهم در میزان مادون سرد کردن مایع مبرد نوع مبرد است (نصب افقی ریسیور = سطح تماس بیشتر مایع برای خنک شدن) ولی از نظر طراحی این نوع نصب مشکلات خاصی در بر دارد و ایده آل نیست (گرفتن حجمی زیادی زیاد از فضا)و (نصب عمودی ریسیور = گذر و تماس طولانی به سطح بدنه برای دفع حرارت بیشتر) و همچنین وجود این ستون مایع مبرد باعث ایجاد تلاطم و آشفتگی در مبرد می گردد، که این امر خود باعث افزایش فشار می شود. این افزایش فشار باعث ایجاد سابکولینگ در دمای ثابت می شود. از نظر مباحث **تئورهای فیزیک** در سطح دیوارها ی ریسیور سابکولینگ می بایست خوب باشد ولی از آنجایکه ما با شرایط دینامیکی سامانه روبرو هستیم (همه چیز در سامانه در حرکت است) قسمتی از مایع مبرد که خیلی کم سابکول شده بدون هر گونه تبادل حرارتی و سابکول شدن بطرف پائین ریسیور هدایت می شود . به اضافه اینکه آب بند بودن مایع مبرد در ریسیور و دمای پائین محیط باعث خنک شدن بیشتر دمای اشباع می شود. در چنین شرایطی مبرد می تواند ریسیور را با مقدار بیشتر سابکول ترک

کند. قابل ذکر است با نصب یک ریسیور پهن نیز می توان به این مهم دست یافت. البته باید ذکر کرد به این روش نمی توان اعتماد داشت چرا که اولین افت فشار در **خط پائین دست** ریسیور اتفاق می افتد ، و شاید به خاطر همین مطلب است که در اکثر سامانه های برودتی سعی در عدم استفاده ریسیور در پائین دست توصیه می شود .



Simplified diagram of thermodynamic processes in a refrigerant receiver

شکل : 17

ماخذ:Guntner AG & Co. KG