



Wrocław
University
of Science
and Technology

Chłodnictwo i kriogenika

Systemy ziębienia. Metody zwiększenia COP

Dr inż. Tomasz Hałon



Plan wykładu

- Klasa bezpieczeństwa
- Klasyfikacja pomieszczeń
- Maksymalne napełnienie czynnikiem
- Klasyfikacja systemów chłodniczych

Klasa bezpieczeństwa

- 1. Grupa A:** Czynniki ziębnicze nie mające szkodliwego wpływu na większość pracowników, którzy mogą być narażeni na ich działanie codzienne, w ciągu 8 godzinnego dnia pracy i 40 godzinnego tygodnia pracy, przy średnim ważonym względem czasu stężeniu **400 ml/m³, lub powyżej**
- 2. Grupa B:** Czynniki ziębnicze nie mające szkodliwego wpływu na większość pracowników, którzy mogą być narażeni na ich działanie codzienne, w ciągu 8 godzinnego dnia pracy i 40 godzinnego tygodnia pracy, przy średnim ważonym względem czasu stężeniu **poniżej 400 ml/m³,**

Wyższa palność	A3	B3
Niższa palność	A2	B2
Niepalność	A1	B1
	Niższa toksyczność	Wyższa toksyczność

Kategoria dostępu

Klasa	Charakterystyka ogólna	Przykłady ^a
Ogólny dostęp a	<p>Pomieszczenia, części budynków, budynki, w których:</p> <ul style="list-style-type: none"> - udostępniono wyposażenie do spania; - ludzie mają ograniczone możliwości poruszania się; - istnieje możliwość obecności niekontrolowanej liczby osób - każda osoba ma dostęp, również nie zapoznana z koniecznymi środkami bezpieczeństwa. 	<p>Szpitala, gmachy sądowe lub więzienia, teatry, supermarkety, szkoły, sale wykładowe, dworce pasażerskie, hotele, budowle mieszkalne, restauracje.</p>
Dostęp nadzorowany b	<p>Pomieszczenia, części budynków, budynki, w których może się gromadzić tylko ograniczona liczba osób, przy czym niektóre są obowiązkowo zapoznane z podstawowymi środkami bezpieczeństwa zakładu.</p>	<p>Biura i urzędy, laboratoria, miejsca ogólnego wykonywania produkcji i miejsca wykonywania pracy.</p>
Dostęp kontrolowany c	<p>Pomieszczenia, części budynków, budynki, do których mają dostęp tylko osoby uprawnione, zapoznane z ogólnymi i szczególnymi środkami bezpieczeństwa w zakładzie, oraz gdzie ma miejsce produkcja, przetwarzanie lub składowanie materiałów i wyrobów.</p>	<p>Obiekty i urządzenia do produkcji, np. chemikaliów, żywności, napojów, lodu, lodów, rafinerie, chłodnie, mleczarnie, rzeźnie, pomieszczenia supermarketów wyłączone z publicznego dostępu.</p>

^a Lista przykładów nie jest wyczerpująca.

Usytuowanie instalacji (lokalizacja)

1. Instalacja ziębnicza usytuowana w pomieszczeniu zajmowanym przez ludzi, które nie jest maszynownią,
2. Instalacja ziębnicza, w której strona wysokiego ciśnienia (z wyjątkiem skraplaczy chłodzonych powietrzem) jest usytuowana w maszynowni (norma EN 378-3) lub na otwartej przestrzeni,
3. Instalacja ziębnicza, której wszystkie części składowe są usytuowane w wydzielonej maszynowni lub na otwartej przestrzeni, nie ma ograniczeń napełnienia ziębnikiem.
4. Obudowa wentylowana.

UWAGA: Instalacje ziębnicze lub ich części składowe nie powinny być instalowane na klatkach schodowych, w wejściach lub wyjściach, do których jest publiczny dostęp i powodują ograniczenia swobodnego przejścia.

Maksymalne napełnienie

Klasa toksyczności	Kategoria dostępu		Klasyfikacja lokalizacji				
			I		II	III	IV
A	a		Toksyczność dopuszczalna × objętość pomieszczenia lub patrz C.3		Bez ograniczeń ^a	Wymagania dotyczące napełnienia oparte na toksyczności określa się odnośnie lokalizacji I, II lub III, w zależności od umiejscowienia obudowy wentylowane ^j	
	b	Na piętrach, bez odpowiednich wyjść awaryjnych lub poniżej poziomu terenu	Toksyczność dopuszczalna × objętość pomieszczenia lub patrz C.3				Bez ograniczeń ^a
		Inne	Bez ograniczeń ^a				
	c	Na piętrach, bez odpowiednich wyjść awaryjnych lub poniżej poziomu terenu	Toksyczność dopuszczalna × objętość pomieszczenia lub patrz C.3				
		Inne	Bez ograniczeń ^a				
B	a		Dla hermetycznych układów sorpcyjnych, toksyczność dopuszczalna × objętość pomieszczenia i nie więcej niż 2,5 kg, wszystkie inne systemy toksyczność dopuszczalna × objętość pomieszczenia		Bez ograniczeń ^a		
	b	Na piętrach, bez odpowiednich wyjść awaryjnych lub poniżej poziomu terenu	Toksyczność dopuszczalna × objętość pomieszczenia				Napełnienie nie większe niż 25 kg ^a
		Mniej niż 1 osoba na 10m ²	Napełnienie nie większe niż 10 kg ^a				Bez ograniczeń ^a
		Inne					Napełnienie nie większe niż 25 kg ^a
	c	Mniej niż 1 osoba na 10m ²	Napełnienie nie większe niż 50 kg ^a i wyjścia awaryjne są dostępne				Bez ograniczeń ^a
		Inne	Napełnienie nie większe niż 10 kg ^a				Napełnienie nie większe niż 25 kg ^a

^a Na wolnym powietrzu stosuje się normę EN 378-3: 2016, 4.2, a w pomieszczeniach maszynowni normę EN378-3: 2016, 4.3.

Maksymalne napełnienie

Klasa zapalności	Kategoria dostępu		Klasyfikacja lokalizacji			
			I		II	
2L	a	Komfort człowieka	Zgodnie z C.2 i nie więcej niż $m_2^a \times 1,5$ lub Zgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$		Bez ograniczeń ^c	Napętnienie ziębnikiem nie większe niż $m_3^b \times 1,5$
		Inne zastosowania	20% x LFL x Objętość pomieszczenia i nie więcej niż $m_2^a \times 1,5$ lub Zgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$			
	b	Komfort człowieka	Zgodnie z C.2 i nie więcej niż $m_2^a \times 1,5$ lub Zgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$			
		Inne zastosowania	20% x LFL x Objętość pomieszczenia i nie więcej niż $m_2^a \times 1,5$ lubZgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$	20% x LFL x Objętość pomieszczenia i nie więcej niż 25 kg ^c lub zgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$		
	c	Komfort człowieka	Zgodnie z C.2 i nie więcej niż $m_2^a \times 1,5$ lub Zgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$			
		Inne zastosowania	20% x LFL x Objętość pomieszczenia i nie więcej niż $m_2^a \times 1,5$ lub Zgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$	20% x LFL x Objętość pomieszczenia i nie więcej niż 25 kg ^c lub zgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$		
		Mniej niż 1 osoba na 10m ²	20% x LFL x Objętość pomieszczenia i nie więcej niż 50 kg ^a lub zgodnie z C.3 i nie więcej niż $m_3^b \times 1,5$	Bez ograniczeń ^c		

^a $m_2 = 26 \text{ m}^3 \times \text{LFL}$.

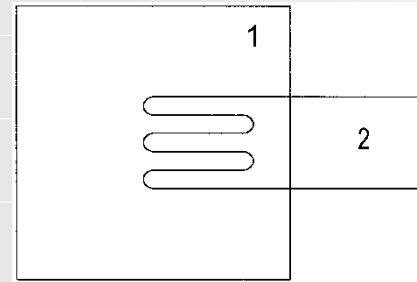
^b $m_3 = 130 \text{ m}^3 \times \text{LFL}$.

^c Na wolnym powietrzu stosuje się normę EN 378-3: 2016, 4.2, a dla pomieszczeń maszynowni stosuje się normy EN 378-3: 2016, 4.3.

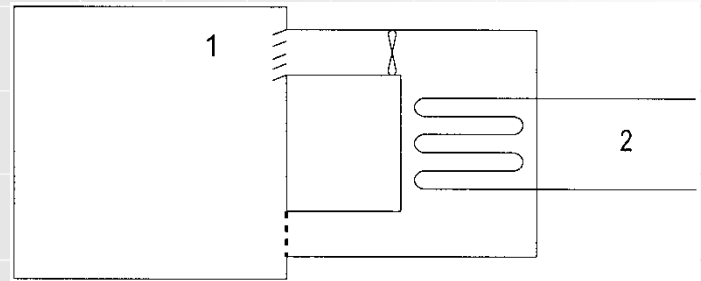
$$m_{\max} = 2,5 \times \text{LFL}^{5/4} \times h_0 \times A^{1/2}$$

Klasyfikacja pomieszczeń

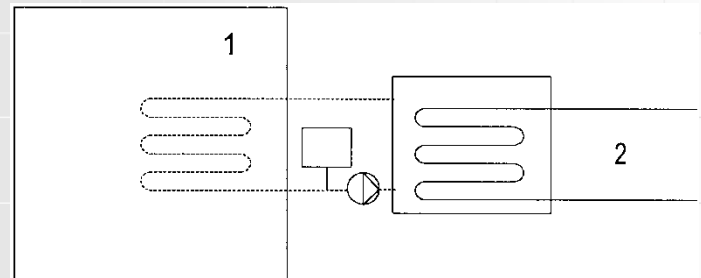
System bezpośredni



System bezpośredni kanałowy

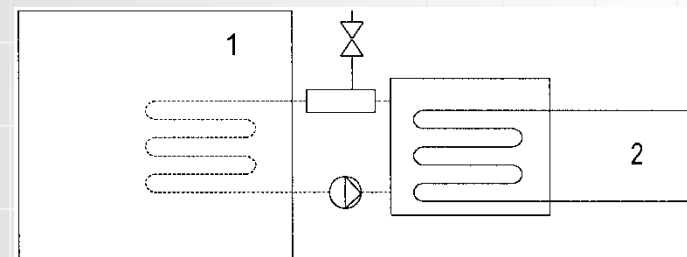


System pośredni zamknięty

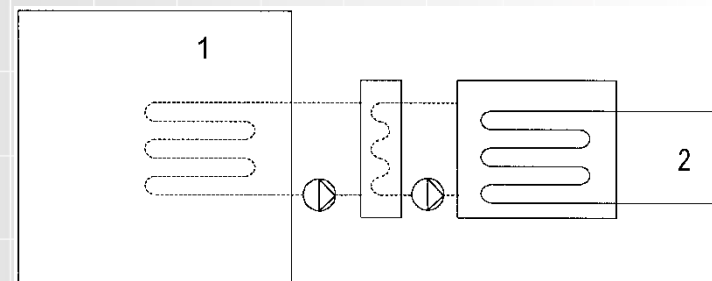


Klasyfikacja pomieszczeń

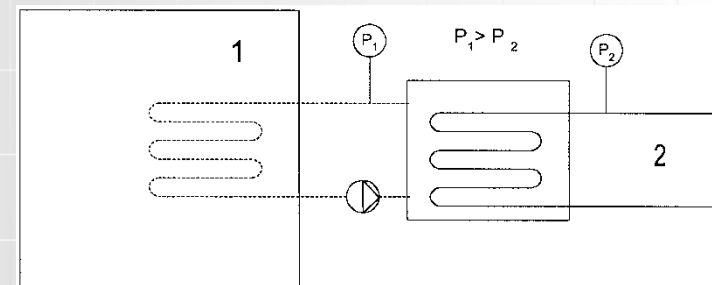
System pośredni wentylowany zamknięty



System pośredni podwójny

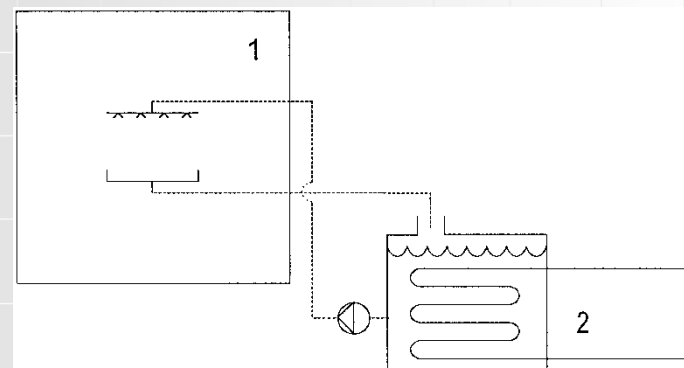


System pośredni wysokociśnieniowy

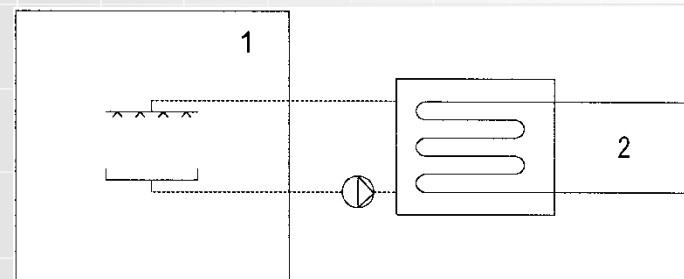


Klasyfikacja pomieszczeń

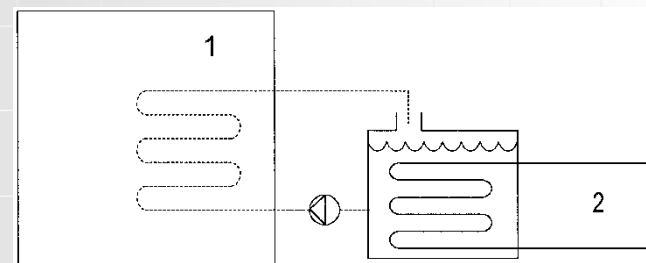
**System otwarty
wentylowany natryskowy**



**System otwarty
natryskowy**



**System pośredni
wentylowany**



Metody zwiększania współczynnika efektywności

Wzrost współczynnika efektywności obiegu można osiągnąć poprzez następujące zabiegi:

1. Obniżenie temperatury skraplania.
2. Zastosowanie chłodzenia międzystopniowego/chłodzenia sprężarki
3. Obniżenie temperatury ciekłego czynnika chłodniczego przed wejściem do zaworu rozprężnego (zwiększenie przechłodzenia),
4. Zmniejszenie przegrzania par przed wejściem do sprężarki.
5. Podniesienie temperatury parowania (zmniejszenie różnicy temperatur pomiędzy temperaturą docelową chłodzonego medium a temperaturą parowania.
6. Zastosowanie obiegów wielostopniowych.

1. Obniżenie temp. skraplania

Solkane 6.0.1 - [SOLKANE® 507]

File Refrigerants Calculation Options Windows Help www Disclaimer

R22 R23 R32 R123 R124 R125 R134a R143a R152a R227 R365mfc R404A R407C R409A R410A R507 SES36 R11 R12 R502 R13B1 ?

Solkane® 507

Evaporator: Temperature -10,00 °C, Superheating 10,00 K, Pressure drop 0,20 bar, Refrigerating cap 10,0 kW

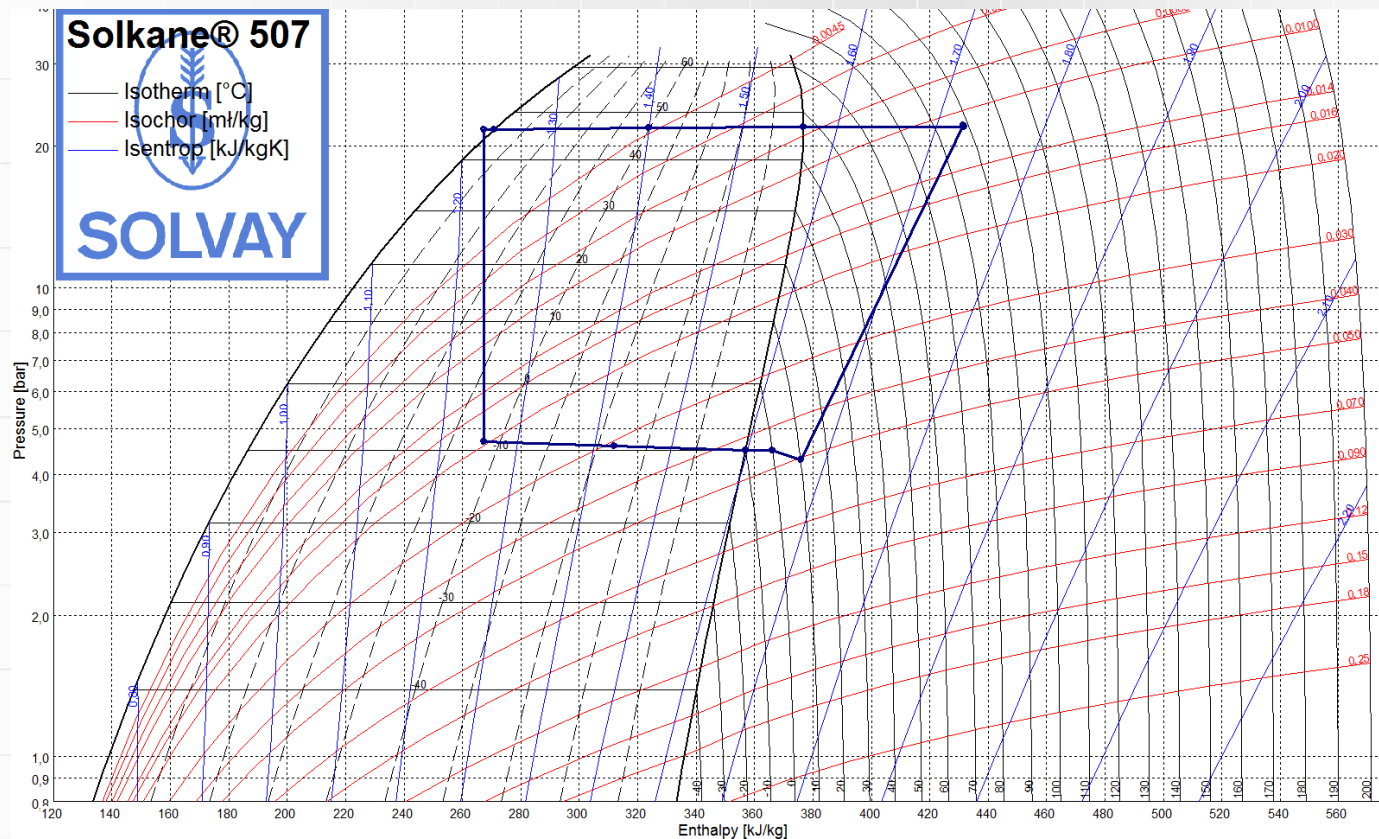
Condenser: Temperature 47,00 °C, Subcooling 2,00 K, Pressure drop 0,30 bar, Calculation

Compressor: Isentr. efficiency 0,650 Auto

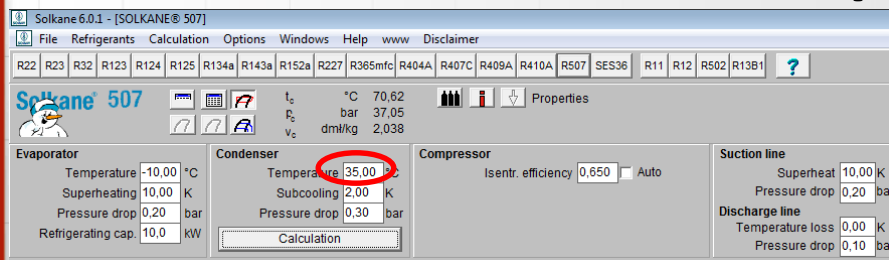
Suction line: Superheat 10,00 K, Pressure drop 0,20 bar

Discharge line: Temperature loss 0,00 K, Pressure drop 0,10 bar

Cycle (F2) Output parameters (F3) COP, Mass flow, etc. (F4) Pipe sizing (F5)			
Power Single-stage process			
Evaporator	10,0 kW	Pressure ratio	4,90
Condenser	16,6 kW	Pressure difference	17,53 bar
Compressor	5,64 kW	Mass flow	101,15 g/s
		Volume flow (Suction line)	18,39 m³/h
		Volum. capacity	1957 kJ/ml
Suction line	0,97 kW	COP	1,77
Discharge line	-0,013 kW		



1. Obniżenie temp. skraplania

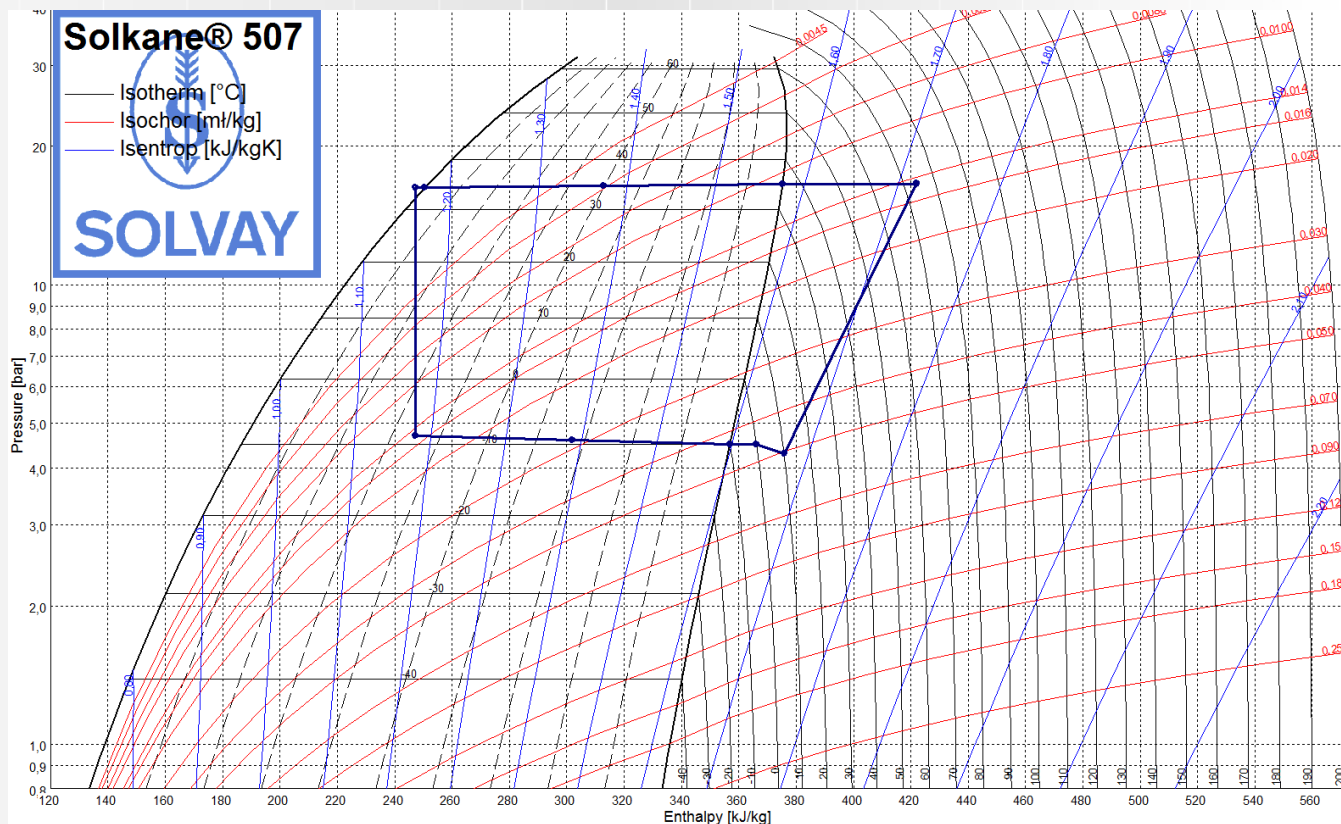


Cycle (F2) Output parameters (F3) COP, Mass flow, etc. (F4) Pipe sizing (F5)			
Power Single-stage process			
Evaporator	10,0 kW	Pressure ratio	3,68
Condenser	14,7 kW	Pressure difference	12,04 bar
Compressor	3,88 kW	Mass flow	84,05 g/s
		Volume flow (Suction line)	15,28 m ³ /h
		Volum. capacity	2356 kJ/m ³
Suction line	0,81 kW	COP	2,58
Discharge line	-0,011 kW		

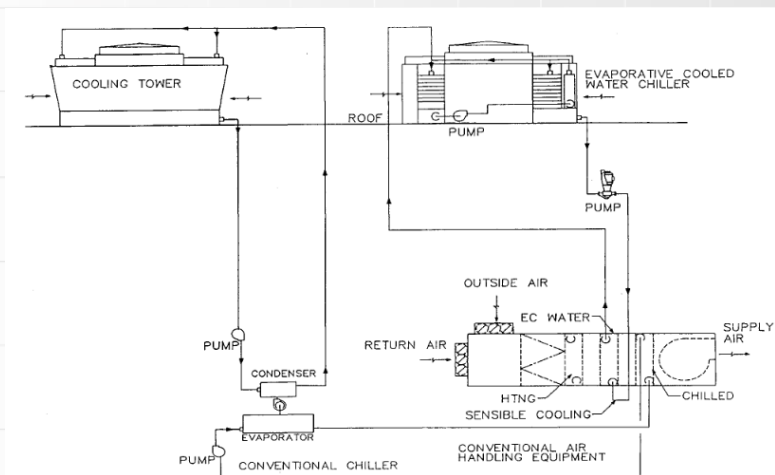
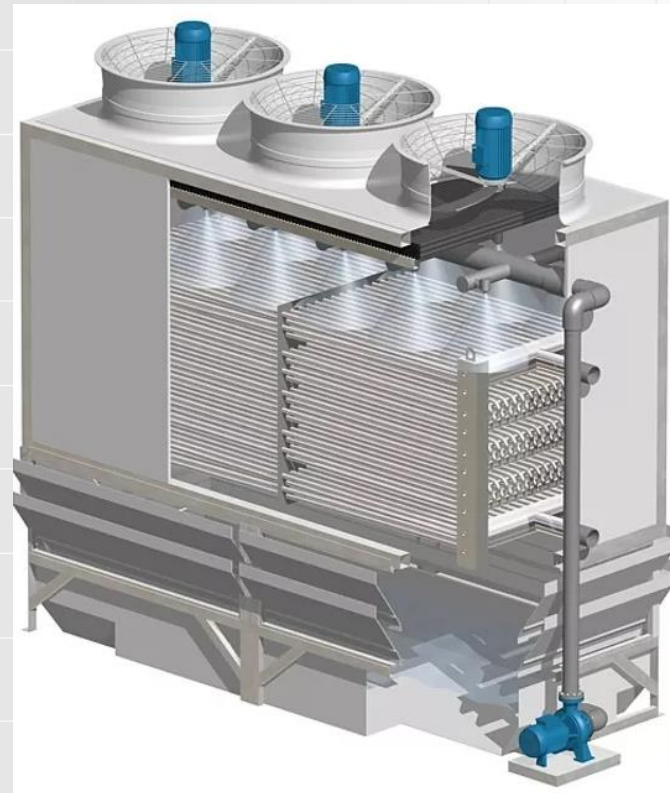
Warunki zmienione:

Niższą temperaturę skraplania umożliwić może spadek temperatury otoczenia przy jednoczesnej współpracy regulatorów elektronicznego zaworu rozprężnego i regulatora wydajności skraplacza.

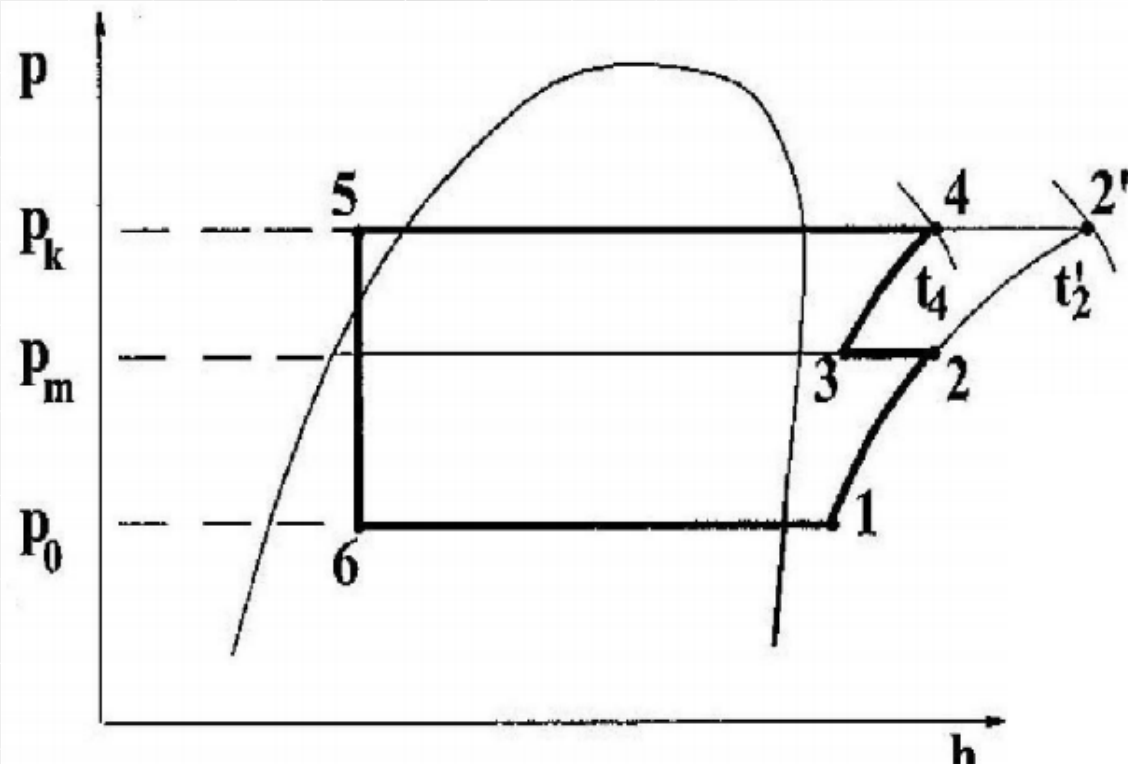
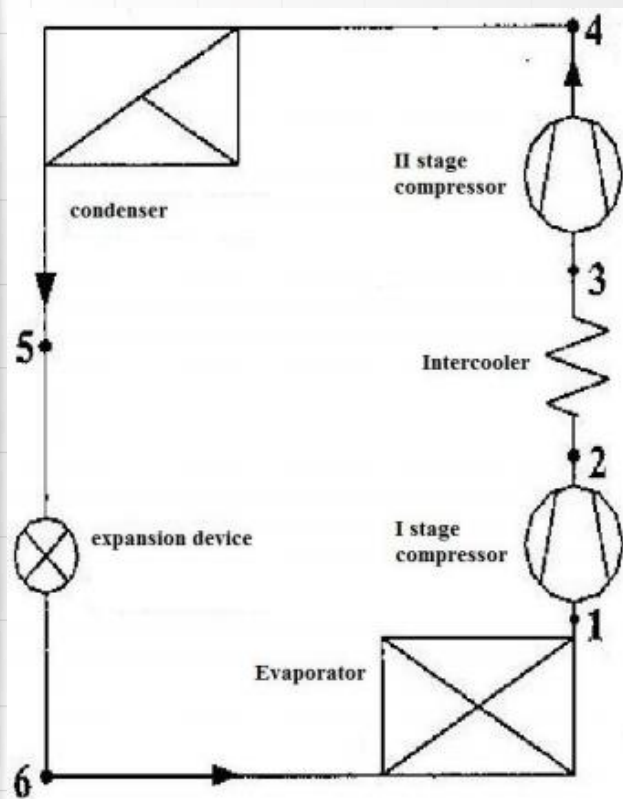
Podobny efekt można uzyskać zwiększając powierzchnię wymiany ciepła skraplacza, ale jedynie w niewielkim zakresie.











Wyparne chłodzenie skraplacza



2. Chłodzenie międzystopniowe



2. Chłodzenie międzystopniowe

SOLKANE® 134a      t_c 101,06 °C p_c 40,59 bar v_c 1,954 dm³/kg    Properties

Evaporator		Condenser		Compressor		Intercooler	
Temperature	-10,00 °C	Temperature	35,00 °C	Isentr. efficiency	0,800	0,800	<input type="checkbox"/> Auto
Superheating	7,00 K	Subcooling	0,00 K	Intermediate pressure	4,22 bar		<input checked="" type="checkbox"/> Auto
Pressure drop	0,00 bar	Pressure drop	0,00 bar	Temperature suction line, HP	15,52 °C		
Refrigerating cap.	1,00 kW			Pressure drop, Gas	0,00 bar		

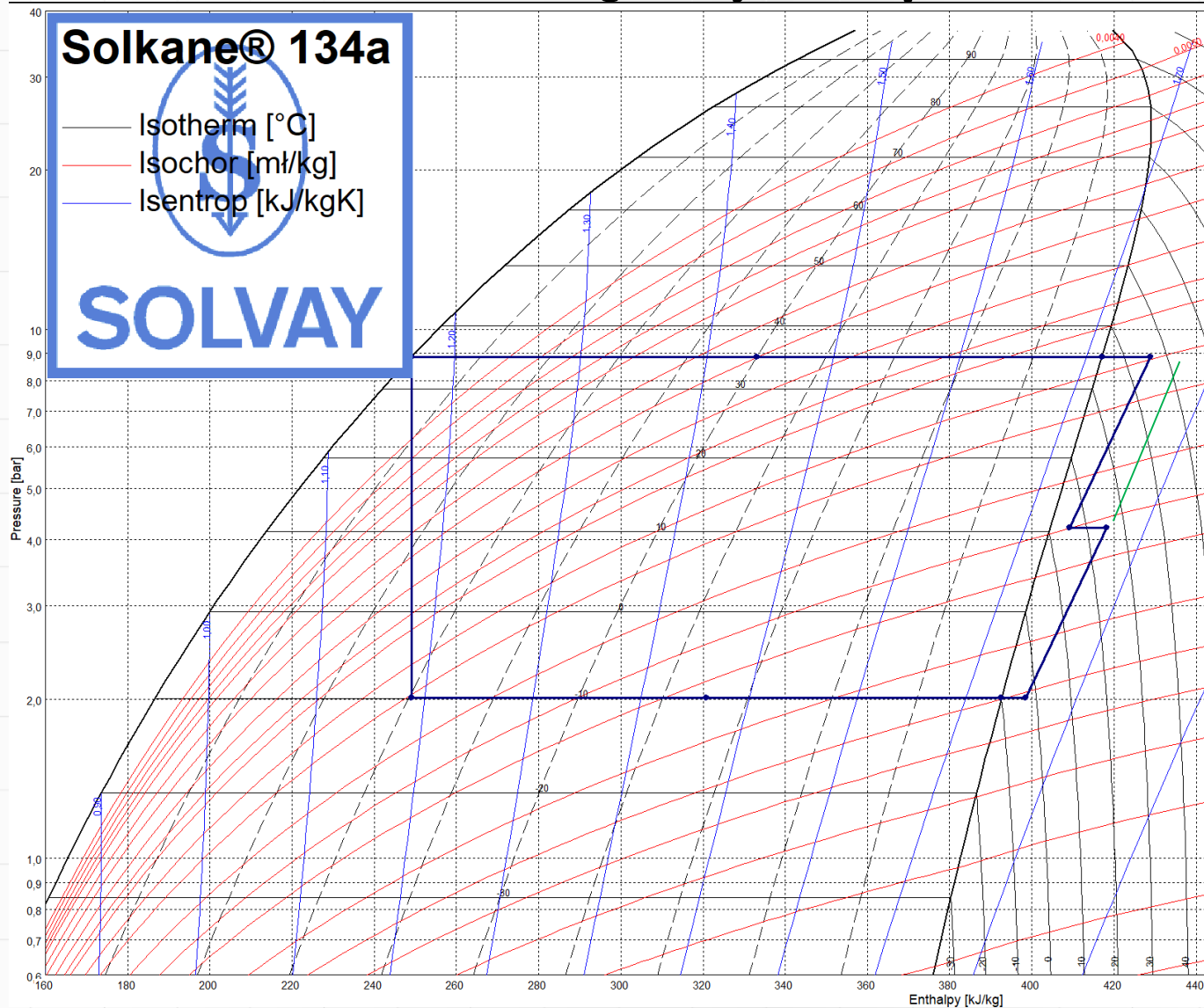
Calculation

Power		Two-stage process with intercooler		LP	HP	complete
Evaporator	1,00 kW	Pressure ratio	2,10	2,10	4,42	
Condenser	1,20 kW	Pressure difference	2,21	4,65	6,86 bar	
Compressor LP	0,13 kW	Mass flow	6,693	6,693	g/s	
Compressor HP	0,13 kW	Volume flow (Suction line)	2,48	1,20	ml/h	
Intercooler	0,060 kW	Volum. capacity	1451		kJ/ml	
Suction line	0,000 kW	COP	3,78			
Discharge line	0,000 kW					

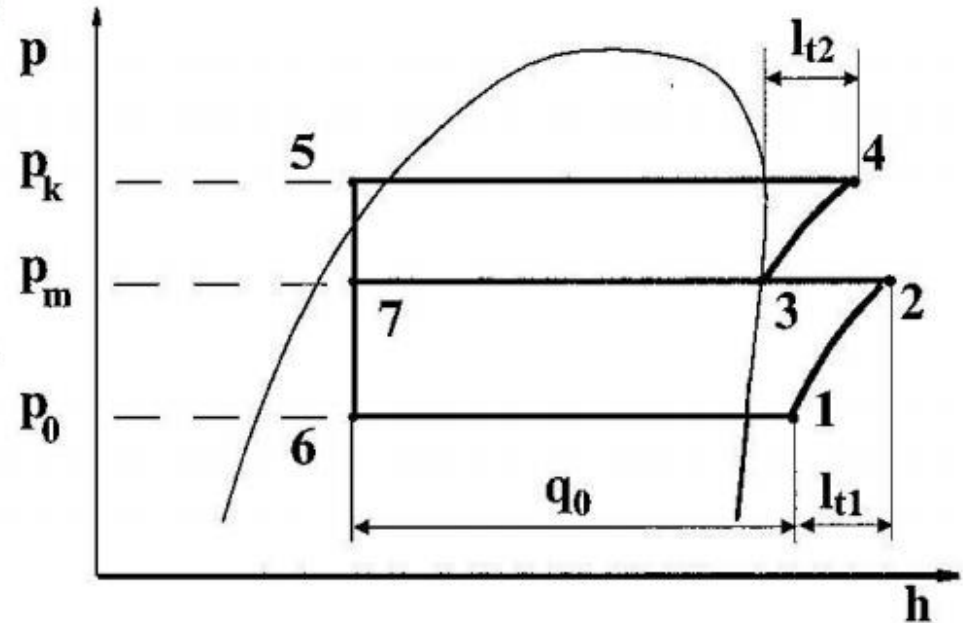
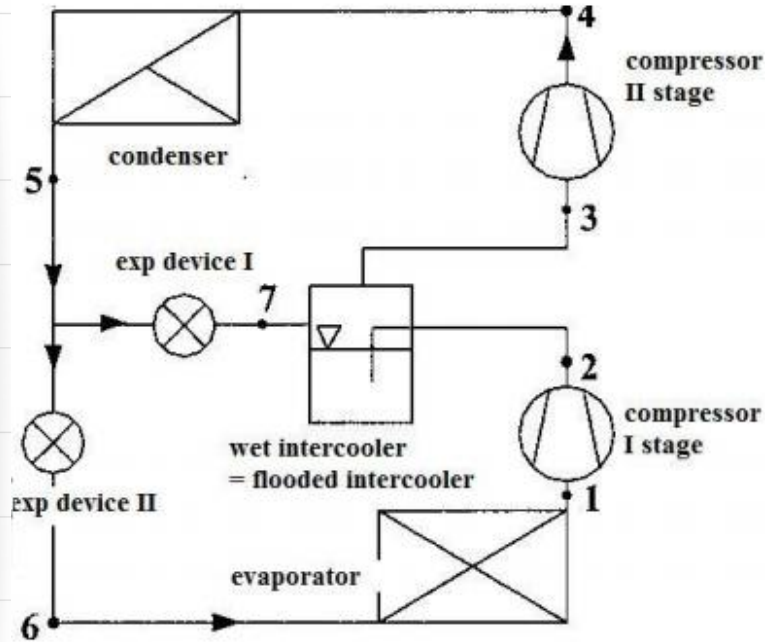
Bez chłodzenia:

Power		Single-stage process	
Evaporator	1,00 kW	Pressure ratio	4,42
Condenser	1,27 kW	Pressure difference	6,86 bar
Compressor	0,27 kW	Mass flow	6,693 g/s
		Volume flow (Suction line)	2,48 ml/h
		Volum. capacity	1451 kJ/ml
Suction line	0,000 kW	COP	3,73
Discharge line	0,000 kW		

2. Chłodzenie międzystopniowe

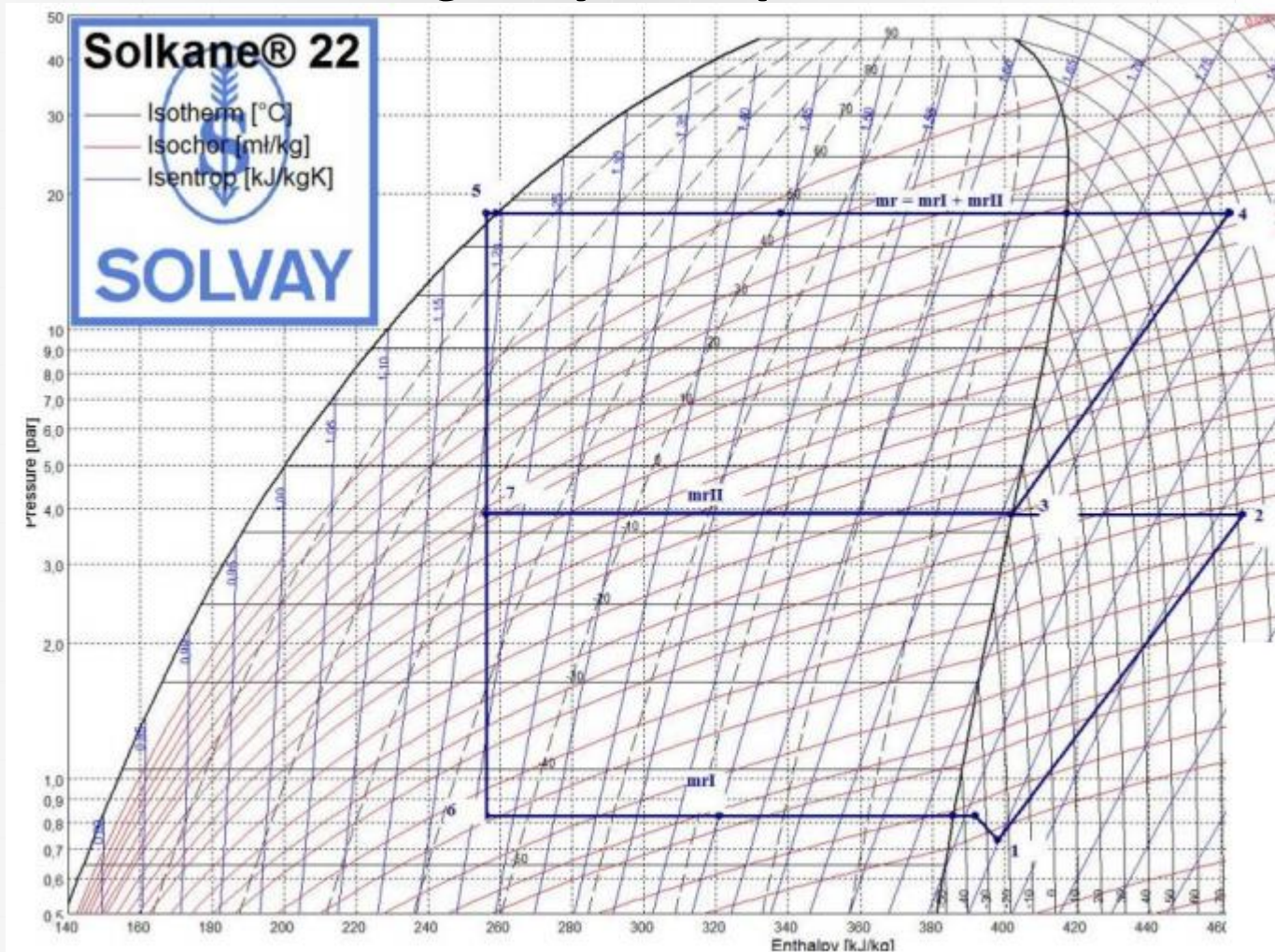


2. Chłodzenie międzystopniowe



$$P_{\text{int}} = \sqrt{p_k \cdot p_0} [\text{bar}]$$

2. Chłodzenie międzystopniowe



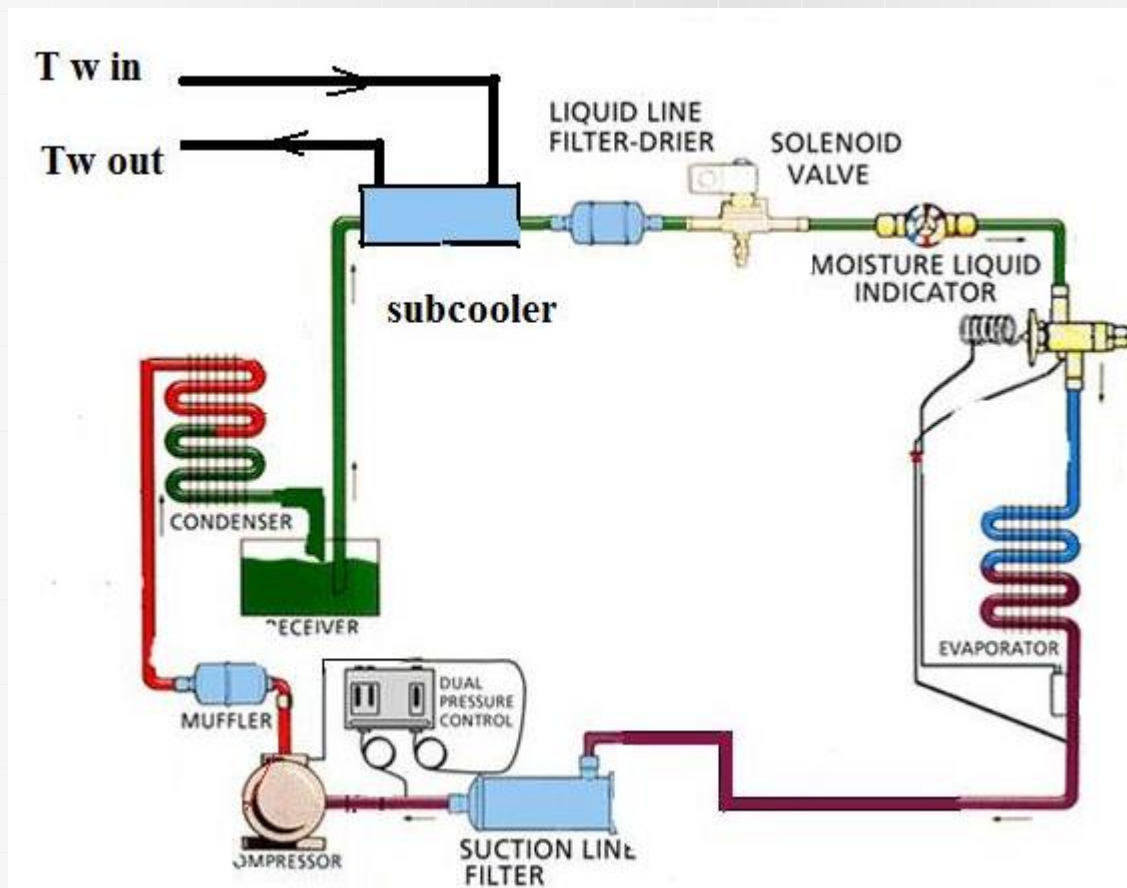
$$\dot{m}_{lr} = \frac{Q_0}{q_0}$$

$$\dot{m}_{lr} \cdot h_2 + (\dot{m}_r - \dot{m}_{lr}) \cdot h_7 = \dot{m}_r \cdot h_3$$

3. Zwiększenie przechłodzenia

- Zastosowanie dochłodzenia ciekłego czynnika przed zaworem rozprężnym za pomocą cieczy o niższej temperaturze lub powietrza o niższej temperaturze od temperatury otoczenia.
- Zastosowanie doziębienia ciekłego czynnika przed zaworem rozprężnym za pomocą pary opuszczającej parowacz i transportowanej do sprężarki.
- Zastosowanie doziębienia ciekłego czynnika przed zaworem rozprężnym za pomocą separacji części strumienia masowego ziębnika i realizacji obiegu z ekonomizerem.

3. Zwiększenie przechłodzenia



3. Zwiększenie przechłodzenia

- Teoretyczny współczynnik efektywności jest zawsze większy od współczynnika efektywności obiegu bez dochłodzenia ze względu na zwiększenie jednostkowego efektu ziębienia o wartość Δh_{sub} .

$$COP = \frac{q_0 + \Delta h_{sub}}{l_c} [-]$$

- W rzeczywistości współczynnik efektywności jest niższy niż teoretyczny ze względu na konieczność napędu urządzeń dostarczających ciecz lub powietrze do wymiennika spełniającego rolę dochładzacza.

$$COP = \frac{Q_0 + Q_{sub}}{W_{ct} + W_{fe} + W_{fc} + W_{psub}} [-]$$

3. Zwiększenie przechłodzenia

Solkane® 507

t_c °C 70,62
 p_c bar 37,05
 v_c dm³/kg 2,038

Evaporator		Condenser	
Temperature	-10,00 °C	Temperature	47,00 °C
Superheating	10,00 K	Subcooling	2,00 K
Pressure drop	0,20 bar	Pressure drop	0,30 bar
Refrigerating cap.	10,0 kW	Calculation	

Power	Single-stage process
Evaporator	10,0 kW
Condenser	16,6 kW
Compressor	5,64 kW
Suction line	0,97 kW
Discharge line	-0,013 kW

Pressure ratio	4,90
Pressure difference	17,53 bar
Mass flow	101,15 g/s
Volume flow (Suction line)	18,39 m ³ /h
Volum. capacity	1957 kJ/m ³
COP	1,77

SOLKANE® 507

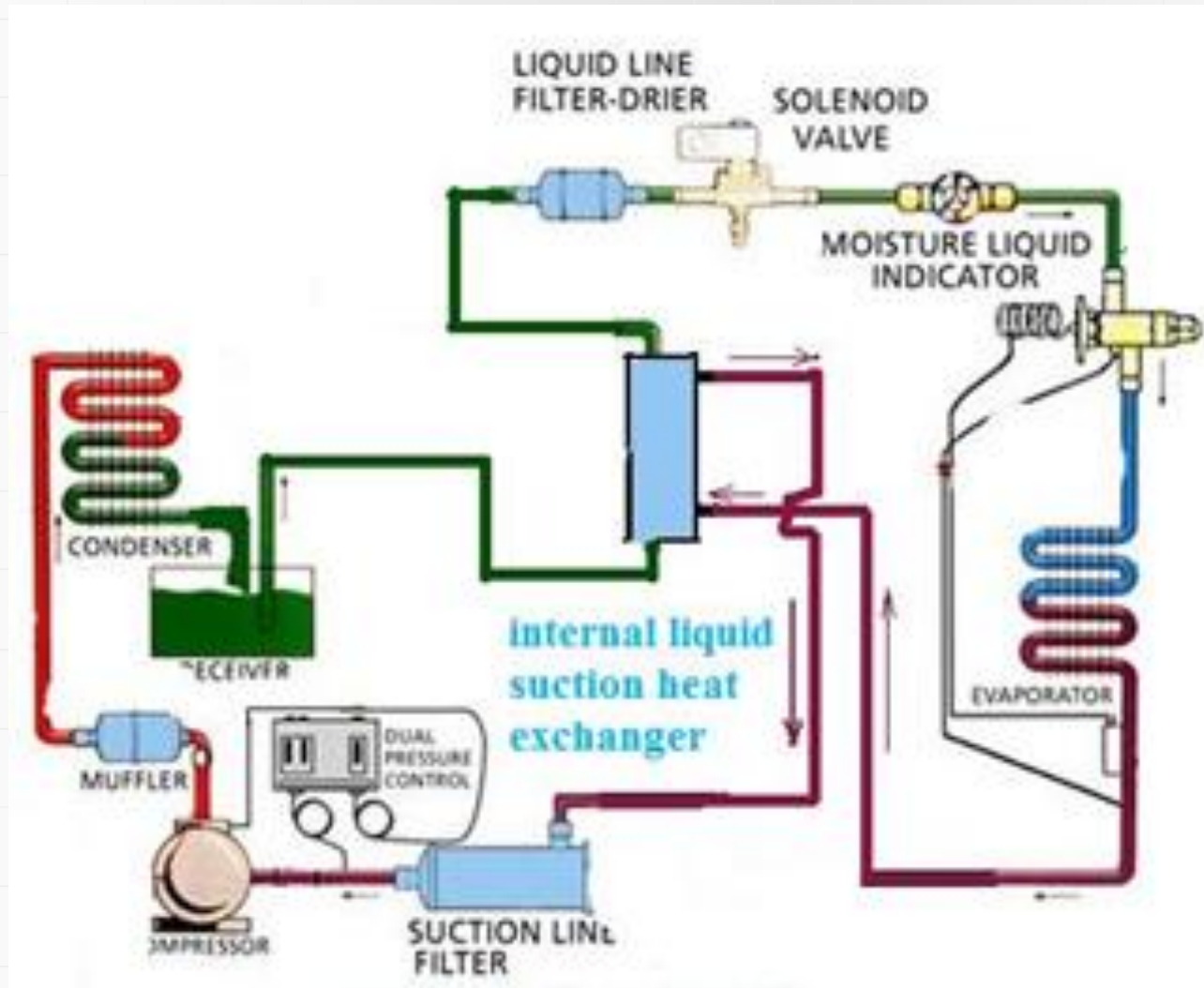
t_c °C 70,62
 p_c bar 37,05
 v_c dm³/kg 2,038

Evaporator		Condenser	
Temperature	-10,00 °C	Temperature	47,00 °C
Superheating	10,00 K	Subcooling	8,00 K
Pressure drop	0,20 bar	Pressure drop	0,30 bar
Refrigerating cap.	10,0 kW	Calculation	

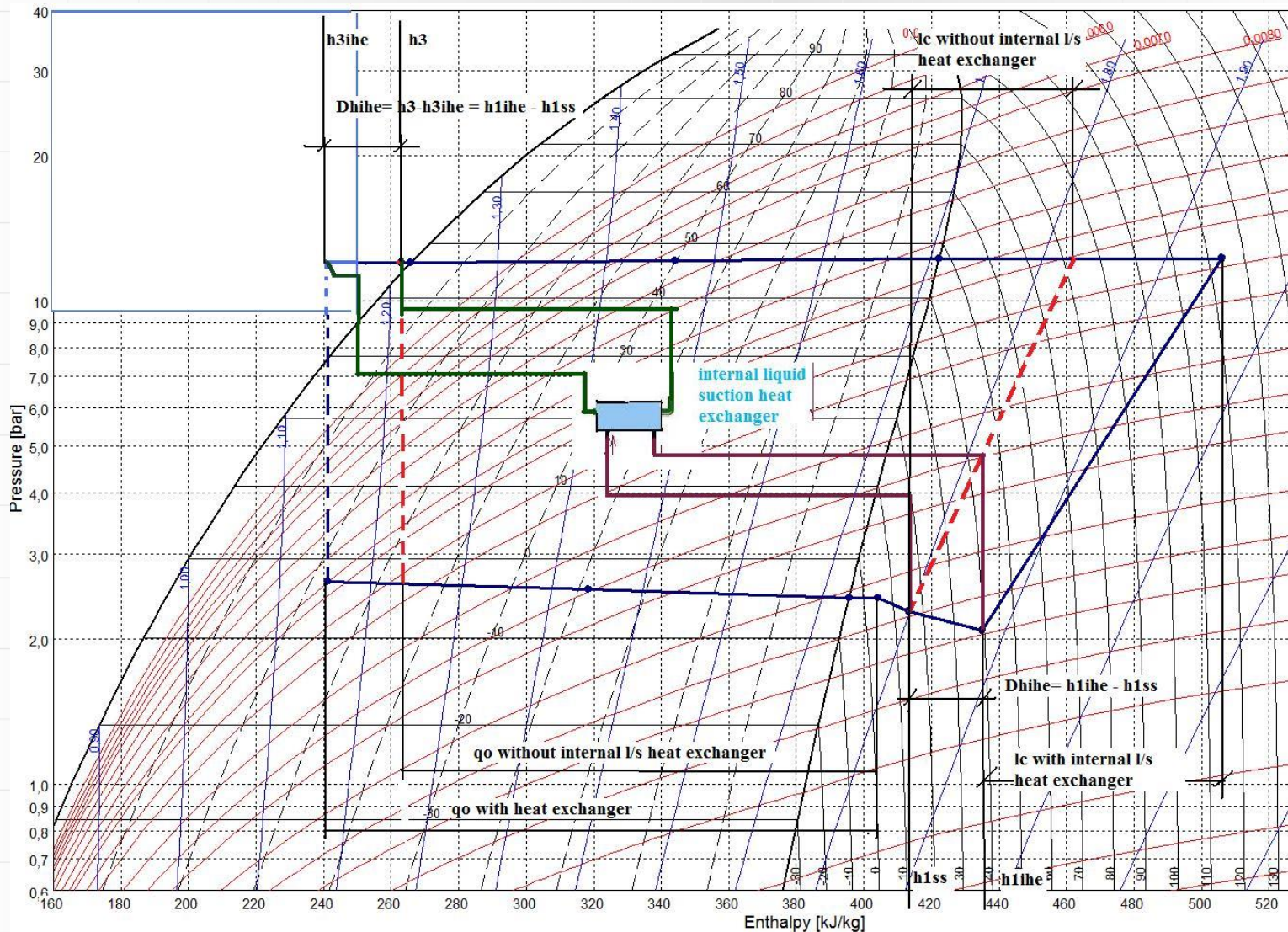
Power	Single-stage process
Evaporator	10,0 kW
Condenser	16,0 kW
Compressor	5,11 kW
Suction line	0,88 kW
Discharge line	-0,011 kW

Pressure ratio	4,90
Pressure difference	17,53 bar
Mass flow	91,68 g/s
Volume flow (Suction line)	16,67 m ³ /h
Volum. capacity	2159 kJ/m ³
COP	1,96

3. Zwiększenie przechłodzenia

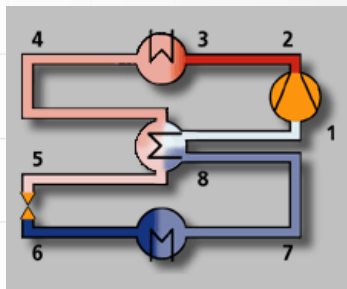


3. Zwiększenie przechłodzenia



3. Zwiększenie przechłodzenia

Bez doziębniacza



Soalkane® 134a

t_c °C 101,06
 p_c bar 40,59
 v_c dm³/kg 1,954

Properties

Evaporator		Condenser		Compressor	
Temperature	-5,00 °C	Temperature	47,00 °C	Isentr. efficiency 0,650	
Superheating	10,00 K	Subcooling	2,00 K		
Pressure drop	0,20 bar	Pressure drop	0,20 bar		
Refrigerating cap.	1,00 kW	Calculation			

Cycle (F2) | Output parameters (F3) | COP, Mass flow, etc. (F4) | Pipe sizing (F5)

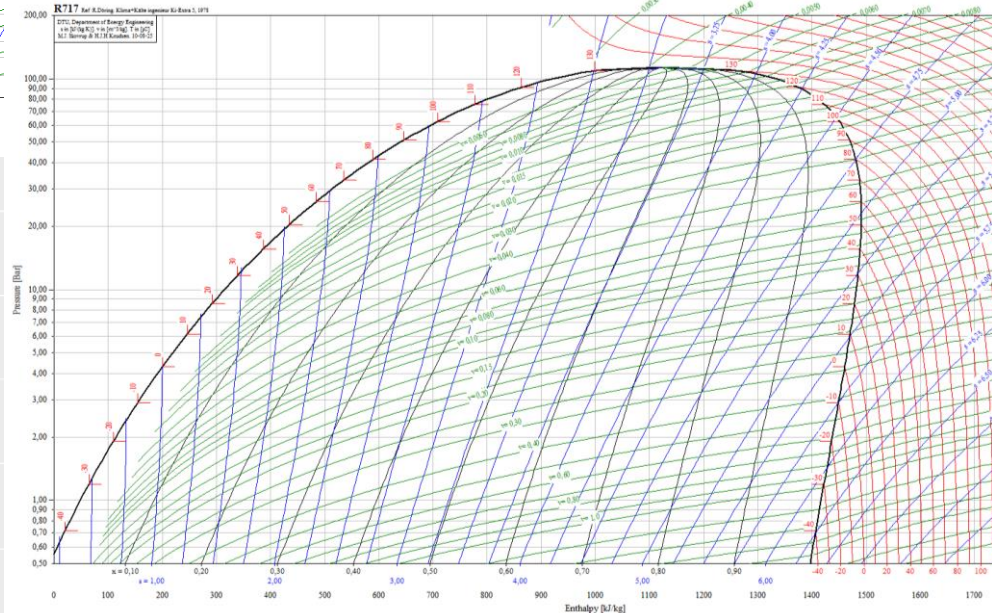
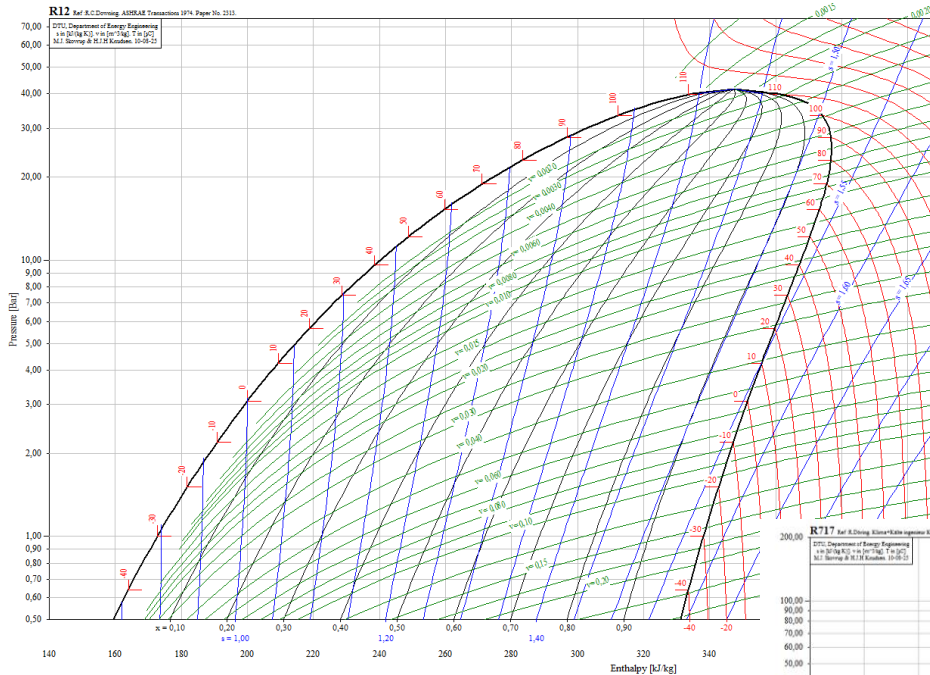
Power				Single-stage process	
Evaporator	1,00 kW	Pressure ratio	5,02		
Condenser	1,49 kW	Pressure difference	9,78 bar		
Compressor	0,43 kW	Mass flow	7,079 g/s		
		Volume flow (Suction line)	2,48 m ³ /h		
		Volum. capacity	1453 kJ/m ³		
		COP	2,35		
Suction line	0,064 kW				
Discharge line	-0,001 kW				

Evaporator		Condenser	
Temperature	-5,00 °C	Temperature	47,00 °C
Superheating	10,00 K	Subcooling	2,00 K
Pressure drop	0,20 bar	Pressure drop	0,20 bar
Refrigerating cap.	1,00 kW	Calculation	

Cycle (F2) Output parameters (F3) COP, Mass flow, etc. (F4) Pipe sizing (F5)					
Power			Single-stage process with internal heat exchanger		
			LP	HP	complete
Evaporator	1,00 kW	Pressure ratio	5,02	1,00	5,02
Condenser	1,49 kW	Pressure difference	9,78	0,00	9,78 bar
Compressor LP	0,43 kW	Mass flow	6,132	6,132	g/s
Compressor HP	0,000 kW	Volume flow (Suction line)	2,60	22,08	m ³ /h
Internal heat exchanger	0,13 kW	Volum. capacity	1384		kJ/m ³
Suction line	0,055 kW	COP	2,30		
Discharge line	-0,001 kW				

Z doziębniaczem

3. Zwiększenie przechłodzenia

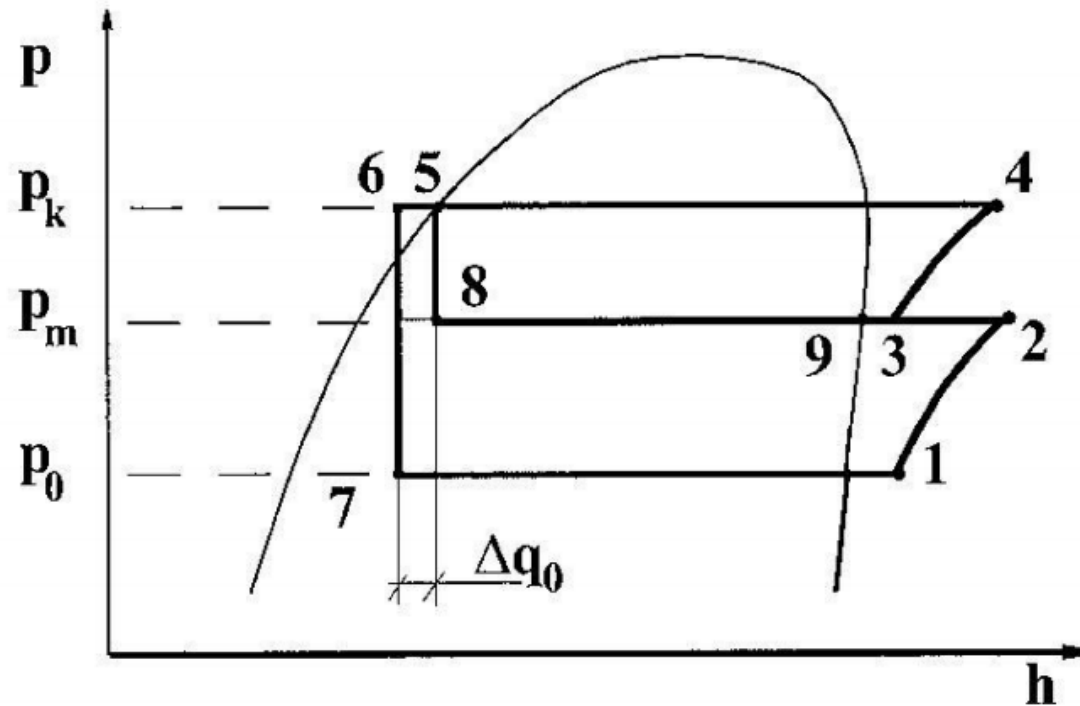
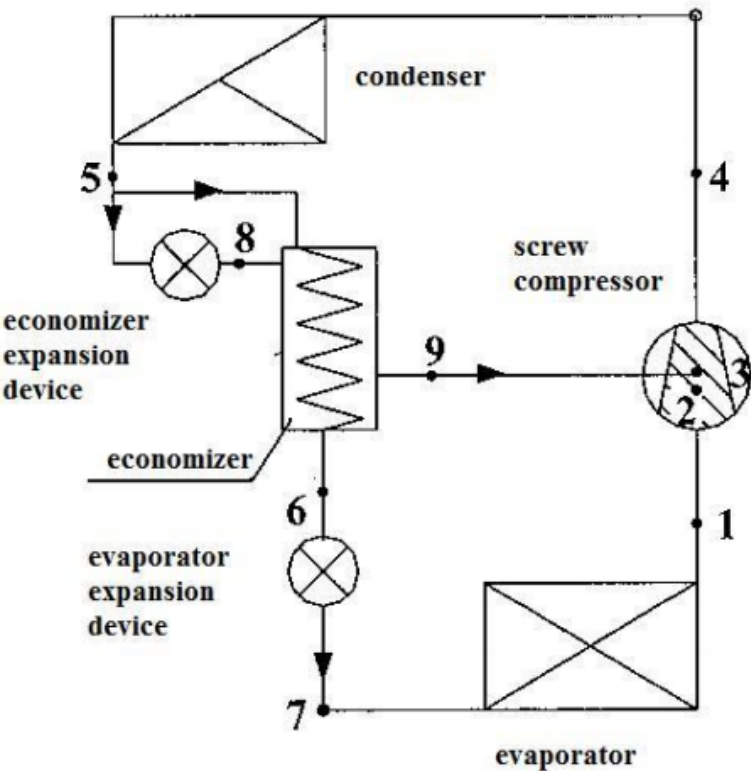


3. Zwiększenie przechłodzenia

- Współczynnik efektywności obiegu z doziębieniem będzie większy od współczynnika efektywności obiegu bez doziębienia w przypadku jeżeli wzrost pracy sprężania będzie mniejszy niż wzrost efektu ziębienia uzyskanego przez wprowadzenia doziębiacza. Ze względu na fakt że każdy ziębnik ma inne własności termodynamiczne za każdym razem należy podjąć takie obliczenia aby stwierdzić czy istnieje konieczność wprowadzenia doziębiacza.

$$COP = \frac{q_0 + \Delta h_{ihe}}{l_{cihe}} [-]$$

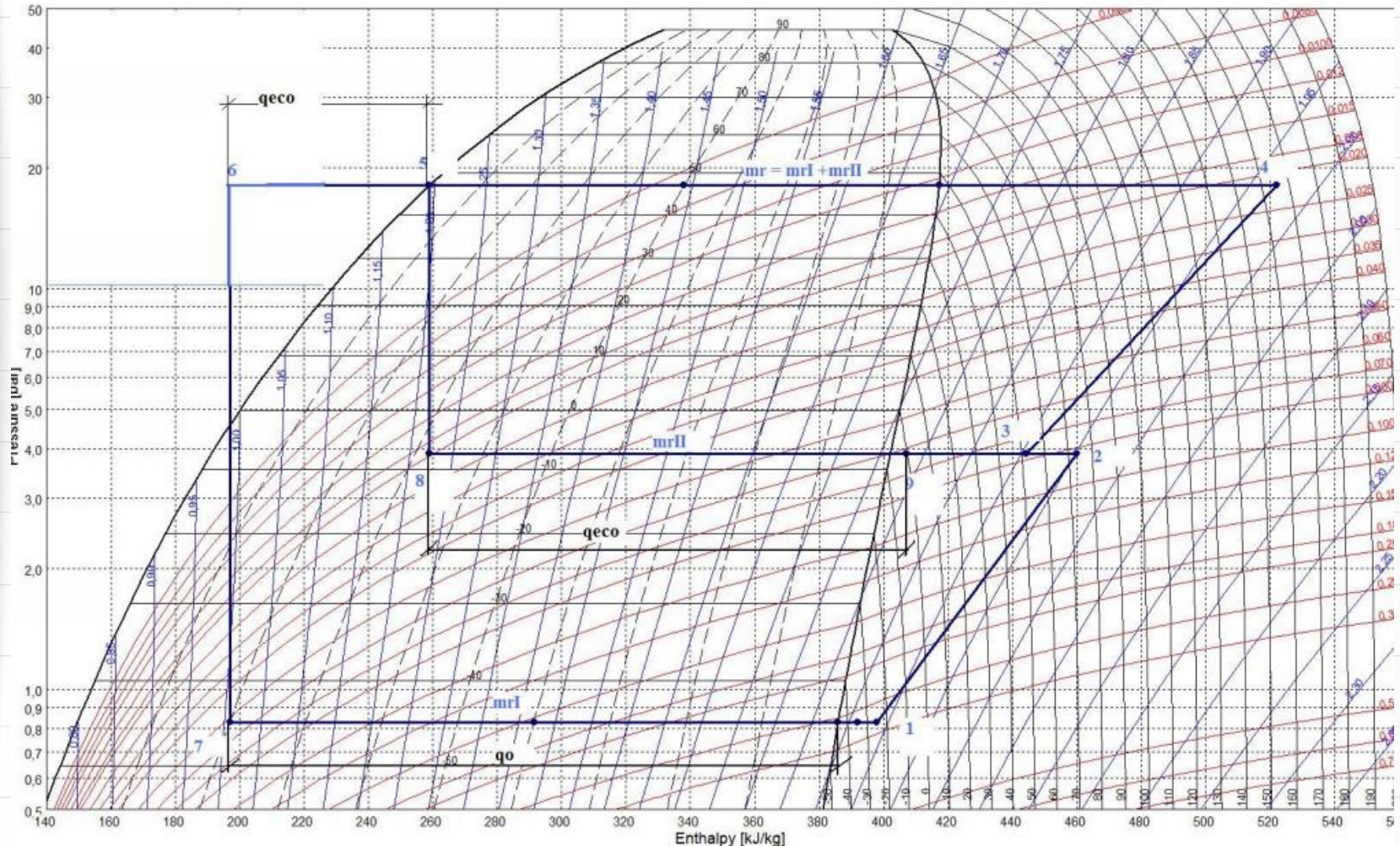
3. Zwiększenie przechłodzenia



3. Zwiększenie przechłodzenia



3. Zwiększenie przechłodzenia



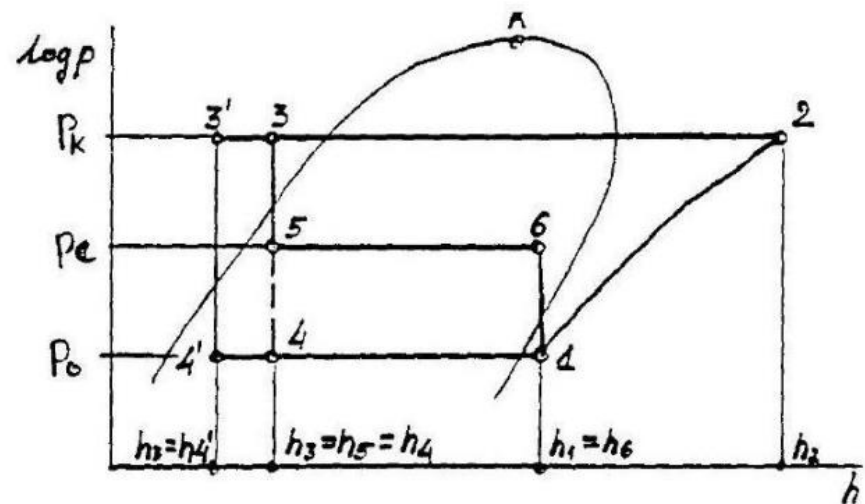
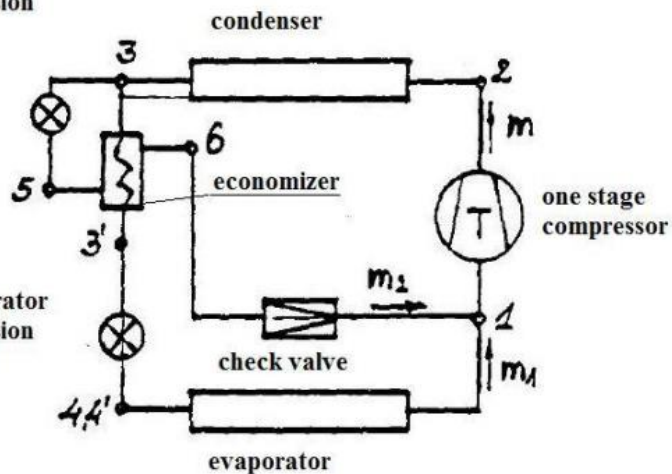
$$\dot{m}_{lr} \cdot (h_5 - h_6) = \dot{m}_{llr} \cdot (h_9 - h_8)$$

$$P_{\text{int}} = \sqrt{p_k \cdot p_0} = \sqrt{18,12 \cdot 0,83} = 3,88[\text{bar}]$$

3. Zwiększenie przechłodzenia

economizer
expansion
device

evaporator
expansion
device



3. Zwiększenie przechłodzenia

