

Laboration i kursen Energiteknik 1MI030

Laboration 3: Värmepump och kylteknik

Två viktiga tillämpningar av termodynamik är kylteknik och värmepump. Båda dessa tillämpningar bygger på en kretsprocess som används för att flytta värme ifrån en kall till en varm behållare. I den här laborationen ska funktionen av en sådan kretsprocess studeras.

Av Martin Magnusson och Per-Erik Larsson.
Bearbetad av David Eriksson.

Inledning

Kylteknikens uppgift är att skapa och upprätthålla temperaturer lägre än omgivningens. Detta sker genom att värme transporteras från en lägre till en högre temperatur. En värmepump fungerar på ett liknande sätt, men utnyttjas för att utvinna värmeenergi från en värmekälla för att framställa varmvatten. Värmepumpar används ofta för uppvärmning av bostäder, eller vid industriella processer, för att minska energiförbrukningen.

För att kunna förflytta värme från en låg temperatur till en högre krävs tillförsel av drivenergi. Detta eftersom termodynamikens andra huvudsats utesluter att värme spontant kan övergå från en kallare till en varmare kropp. För att göra denna transport används en kretsprocess. I det vanligaste fallet för värmepumpar och kylsystem används en kompressionsprocess, vilken idealt följer en omvänd Carnotprocess som arbetar mellan en behållare med låg temperatur och en med högre. Denna kretsprocess fungerar genom att köldmediet förångas vid den lägre temperaturen och kondenserar vid den högre. För att få något sådant att fungera måste trycket ändras i köldmediet. Tryckändringen i köldmediet uppkommer genom en kompressor, placerad efter förångningsprocessen för att komprimera köldmediets ånga till ett högre tryck, och en expansionsventil för att sänka köldmediets tryck.

Innan mätuppgifterna presenteras kommer i det följande den grundläggande teorin och försöksupställningen att förklaras. I nästa avsnitt börjar vi kort med Carnotprocessen för att snabbt övergå till hur kretsprocesser används för kylteknik och värmepumpsystem, därefter presenteras försöksupställningen. Efter detta ges en kort förklaring av teorin för de olika momenten i laborationen. Och tillsist beskrivs de olika laboratiemomenten som ska utföras.

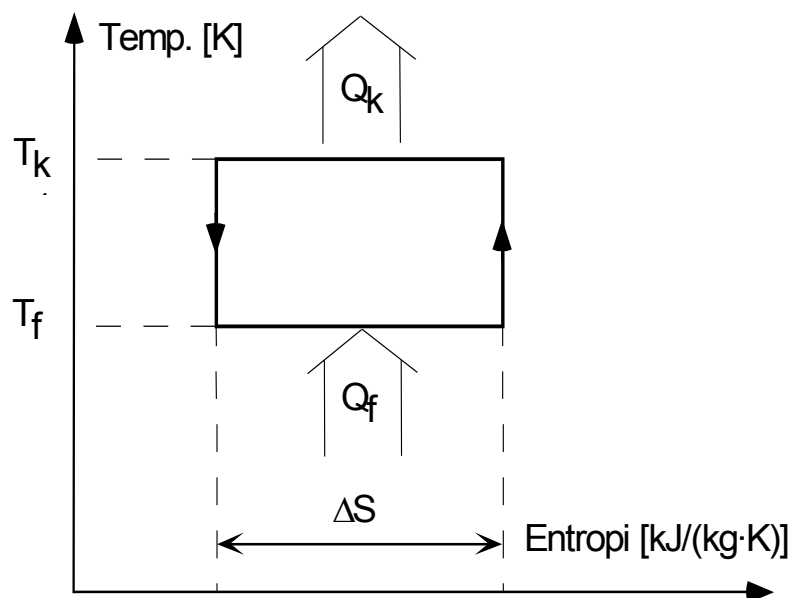
Från Carnotprocess till värmepump

I Carnotprocessen, av intresse för denna laboration, förflyttas energi i form av värme från den kallare behållaren till den varma. Processen är uppbyggd enligt en fyrstegsprocedure, där två av stegen är isotermer och köldmediet är då i kontakt med behållarna. För att binda samman isotermerna till en kretsprocess behövs att köldmediet komprimeras och expanderar, utan att vara i kontakt med de två behållarna. Hur en Carnotprocess fungerar, för kylsystem, avbildas i ett schematiskt temperatur-entropidiagram i figur 1. Det arbete, W , som behövs för att förflytta värme från den

kalla, T_f , till den varma sidan, T_k , (i boken används T_2 och T_1) motsvarar skillnaden mellan avgiven värme, Q_k , och upptagen värme, Q_f , (se ekvation 1).

$$W = Q_k - Q_f \quad (1)$$

Processen som studeras i experimentet är dock inte ideal, och därför behövs det tillföras mer arbete, vilket görs med en kompressor som komprimerar köldmediet. För att få en välfungerade process är det viktigt att välja ett köldmedium med bra egenskaper. Vissa gaser har de sökta egenskaperna att förångas vid den lägre temperaturen och trycket, och kondensera omkring den högre temperaturen och trycket. Tidigare användes ofta freoner, men deras användning har numera begränsats p.g.a. deras påverkan på ozonhalten. Numera är det istället vanligt att använda vätefluorkarboner (HFC), kolväten eller ammoniak. Köldmediet i laborationen kallas för R134a och innehåller $\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$.

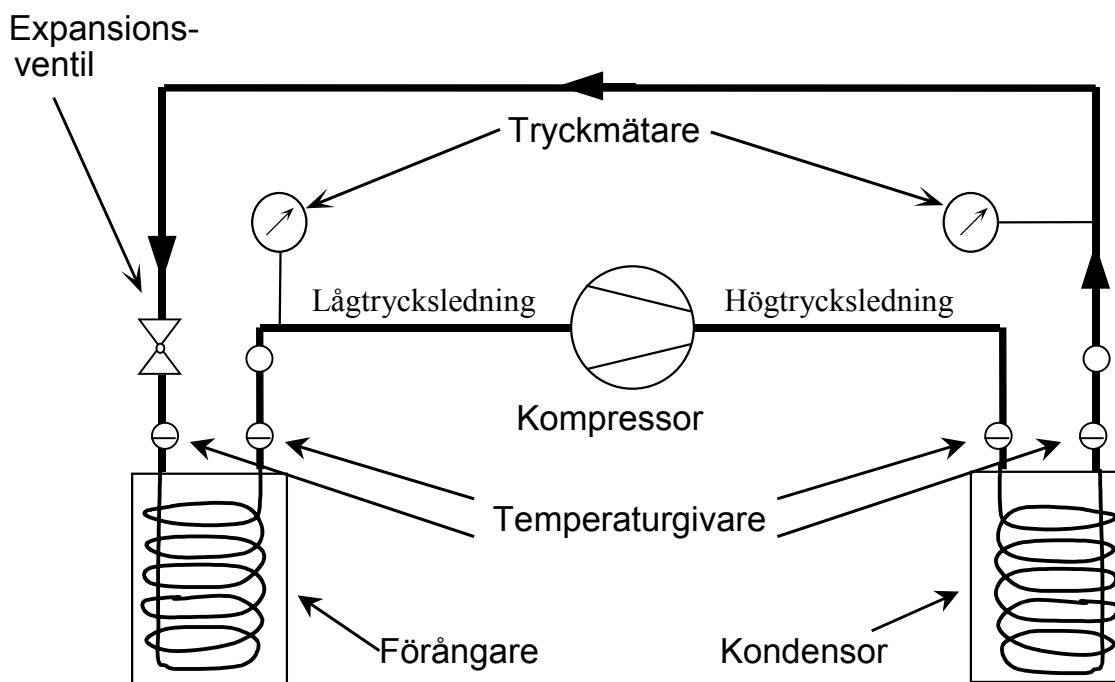


Figur 1. Schematisk bild av en Carnotprocess.

Värmepump

En värmepump består av ett köldmedium som transporteras runt med hjälp av en kompressor. Genom att passera en förångare upptas värme och efter komprimering kan värme avges i kondensorn. Därefter återvänder köldmediet (i vätskeform) till förångaren genom en expansionsventil. Sedan är det dags för ett nytt kretslopp. I figur 2 visas schematiskt hur apparaten är uppbyggd.

Förångaren består av en rörspiral, i vilken köldmediet kokar vid den låga temperaturen. Den värme som överförs, ångbildningsvärmets, kommer från förångarens omgivning (i experimentet är det luft eller vatten), och vi får en avkylning av omgivningen. Den bildade ångan komprimeras i kompressorn till ett högre tryck. Kompressorn kan vara konstruerad enligt kolv-, rotations- eller turboteknik, i detta fall är den av rotationsutförande; och dess uppgift är att komprimera och pumpa köldmediet från förångaren till kondensorn. Genom kompressorn upprätthålls ett lågt tryck i förångaren, vilket gör att köldmediet kokar, och samtidigt ett högt tryck i kondensorn, vilket gör att köldmediet kan kondensera där. Det tillförda kompressorsarbetet på köldmediet gör det möjligt att utnyttja det upptagna värmets ifrån förångaren.



Figur 2. Schematisk bild av värmepumpens konstruktion. Värme förflyttas genom att köldmediet omvandlas ifrån vätska till gas i förångaren och kondenserar till vätska i kondensorn. För att driva processen ökas trycket i köldmediet i kompressorn.

Köldmediet komprimeras alltså till en högre temperatur vid vilken värme kan avges genom kondensation till kondensorns omgivning. Kondensorn använder den komprimerade köldmediegasen, och dess tryck måste vara så högt att omgivningen (ett vattenbad i experimentet) till kondensorn har en lägre temperatur än köldmediet. Efter kondensorn är köldmediet en vätska. För att återgå till köldmediets tillstånd i förångaren behöver trycket sänkas i vätskan. Genom expansionsventilen sänks trycket, och därmed även temperaturen, till den som eftersträvas i förångaren. Vid expansionsventilen sker tillståndsförändringen vid konstant entalpi (strykning).

Både det upptagna och avgivna värmets, i förångaren liksom i kondensorn, sker vid konstant tryck och konstant temperatur för den ideala processen. Vid varje förångningstryck eller kondenseringstryck så finns en motsvarande förångnings respektive kondenseringstemperatur som framgår av köldmediets ångtryckskurva. För att kunna mäta den upptagna respektive avgivna värmemängden finns det tryck och temperaturmätare anslutna till förångaren och kondensorn. Ur de uppmätta resultaten kan den avgivna värmemängden, Q_k (i boken Q_{bortf}), som i kondensorn förs bort till omgivningen, den i förångaren upptagna värmemängden, Q_f (i boken Q_{tillf}), och det på köldmediet utförda kompressionsarbetet, W , enligt ekvation 1 beräknas. I idealfallet antas förloppet i kompressorn ske isentropiskt ($p = \text{konst}$), vilket innebär att kompressionen ska ske snabbt, så att ingen värmeöverföring sker i kompressorn (temperaturdifferensen mellan köldmediet och omgivningen, dvs cylinderväggen, är liten), samt att processen är reversibel (sker utan förluster till omgivningen).

Energiekvationen

Energiekvationen för strömmande medier kan skrivas,

$$q_{12} = i_2 - i_1 + w_{12} + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(h_2 - h_1) \quad (2)$$

där,

q_{12} = utifrån tillförd värme i kJ/kg mellan punkterna 1 och 2 i processen,

i = entalpi i kJ/kg, i_1 vid 1, i_2 vid 2,

w_{12} = utåt avgivet tekniskt arbete i kJ/kg mellan 1 och 2,

c = mediets absoluta hastighet i m/s, c_1 vid 1, c_2 vid 2,

h = mediets höjd över godtycklig nivå i m, h_1 vid 1 och h_2 vid 2,

g = tyngdaccelerationen i m/s^2 .

I energiekvationen har varje term dividerats med massan och anges i kJ/kg. Den tillförda värmen övergår enligt energiekvationen till entalpiökning + avgivet arbete + kinetisk energi + lägesenergi. För värmepumpar som bygger på kompressorer kan de två sista termerna i energiekvationen försummas och ekvation (2) förenklas till,

$$q_{12} = i_2 - i_1 + w_{12} \quad (3)$$

Värmediagram

Den kretsprocess som köldmediet genomlöper vid processen kan vi studera termodynamiskt i ett värmediagram för mediet. Vi använder oss av T-s-diagrammet och log p-i-diagrammet ($i = h$ = entalpi). I figur 3 har en värmeprocess inritats i ett T+s-diagram.

Processen försiggår i huvudsak i det fuktiga (vätska + gas) området. Förloppet i förångaren sker vid konstant tryck och konstant temperatur, och processen där förlöper i diagrammet efter linjen a-b (se figur 3). För processer vid konstant tryck är $w_{12} = 0$. Vid inloppet till förångaren a är köldmediets entalpi i_a , och vid utloppet b då allt

köldmedium förångats genom värmetillförsel är entalpin i_b . Värmeupptaget i förångaren per kilogram köldmedium blir,

$$q_{ab} = i_b - i_a \quad (4)$$

och om den cirkulerade köldmediemängden (massflödet) är \dot{m} kg/s blir energiflödet i kW;

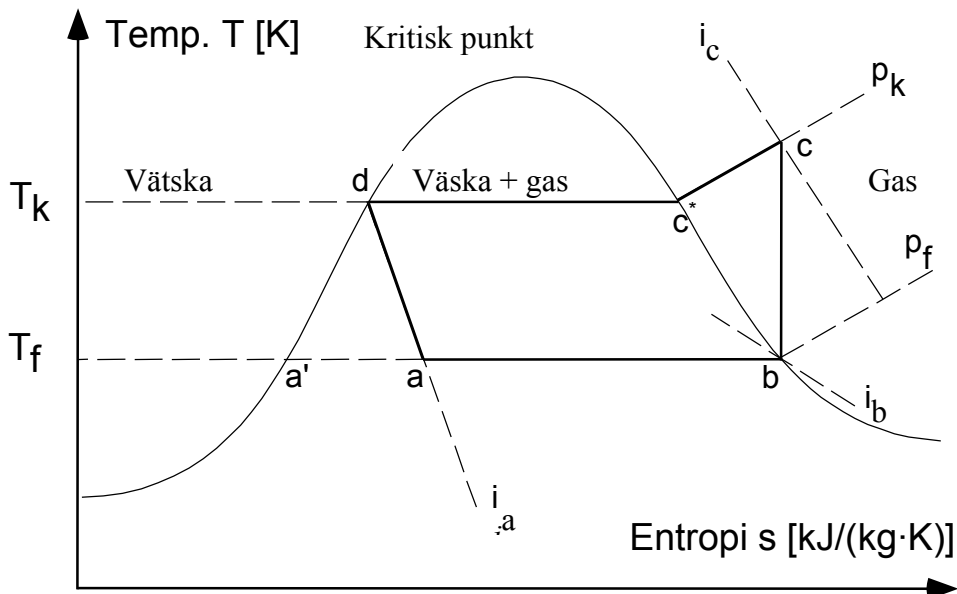
$$\dot{Q}_f = \dot{Q}_{ab} = \dot{m}(i_b - i_a). \quad (5)$$

Kompressorn komprimerar köldmedieånga av torrt mättat tillstånd vid b eftersom allt köldmedium har förångat. Då kompressionen går snabbt, temperaturskillnaden mellan köldmedium och omgivning är oftast liten, antas kompressionen ske adiabatiskt (inget värmeutbyte med omgivningen). I det ideala fallet kan processen anses vara isentropisk och tillståndslinjen följer då en $s = \text{konstant}$ linje från b till c. Entalpin ökar mellan i_b till i_c , det medför enligt energiekvationen 3 att kompressionsarbetet per kg köldmedium blir, (w_{tbc} är negativ då arbetet tillförs mediet)

$$w = -w_{tbc} = i_c - i_b. \quad (6)$$

Om köldmediemängden \dot{m} kg/s cirkulerar så blir den effekt i kW som idealt nedlägges på mediet,

$$P_{teor} = \dot{m}(i_c - i_b) \quad (7)$$



Figur 3. Värmeprocess i ett T-s-diagram.

Tillståndsförändringen i kondensorn äger rum vid konstant tryck, c-d, och från figur 3 kan man se att temperaturen blir konstant när överhettningvärmet avlämnats (c-c*) och

kondenseringstemperaturen T_k uppnått. Överhettningssvärmet utgör endast en liten del av den totala värmeströmmen. Både överhettningssvärmet och kondensationsvärmet ($c^* - d$) överförs i kondensorn.

Enligt energiekvationen får vi att till kondensorn avgiven värme räknat per kg köldmedium är (då p är konstant),

$$-q_{cd} = i_c - i_d \quad (8)$$

om med den cirkulerade köldmediemängden \dot{m} , kg/s, blir energiflödet vid kondensorn,

$$\dot{Q}_k = -\dot{Q}_{cd} = \dot{m}(i_c - i_d) \quad (9)$$

Detta kan enligt ekvation (5) och (7) skrivas i likhet med ekvation 1 som,

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_f + P_{teor} \quad (10)$$

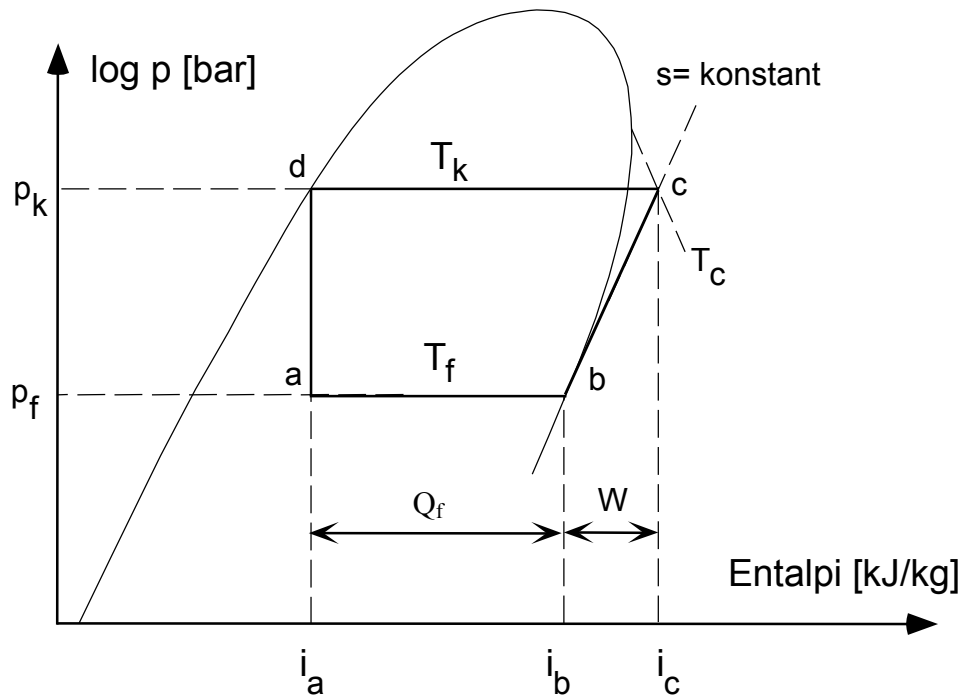
med P_{teor} avses den på mediet nedlagda effekten. På grund av förluster är denna effekt alltid mindre än den till drivmotorn tillförda effekten, P_{tot} .

För att beskrivningen skall vara fullständig återstår förloppet vid expansionsventilen. I expansionsventilen sker en strypning, då trycket sänks utan att något arbete utförs och utan att värmemängden ändras, vilket innebär att entalpin är konstant om strypprocessen är ideal. Nedkylningen av köldmediet går från T_k till T_f genom att trycket minskas. Detta innebär även en förångning. Om köldmediet vid d antas vara vid gränsen till vätska och motsvarande punkt vid temperatur T_f är a' ligger punkten a i det fuktiga området eftersom strypningen sker med konstant entalpi. En del av köldmediet har alltså förångats vid expansionen.

Processen i ett Mollierdiagram

Tillståndsdigrammet för köldmediet kan också representeras av ett Mollierdiagram. Ett sådant diagram är baserat på att entalpin, i , visas på x-axeln och att $\log p$ visas på y-axeln. I figur 4 kan en sådan figur ses.

De intressanta storheterna som värmeupptaget vid förångaren, kompressorarbetet och kondensorsvärmet kan nu direkt avläsas på x-axeln. Och de representeras i detta diagram av de under figuren markerade sträckorna. Alltså, avståndet i diagrammet ger direkt sambandet mellan de tre energimängderna i ekvation 10. För T+s-diagrammet är det ytorna som ger motsvarande resultat.



Figur 4. Ett Mollierdiagram. Där W är kompressorsarbete och Q_2 är köldalstringen.

Köldfaktorn

Den så kallade köldfaktorn ε_k definieras som,

$$\varepsilon_k = \frac{Q_f}{W} \quad (11)$$

där,

Q_f = Värme upptaget i förångaren (även kallat köldalstringen),

W = uträttat arbete på köldmediet.

Ett alternativt sätt att definiera en effektiv köldfaktor (dvs en som är beroende av vilken faktisk värmeöverföring som sker) är m.h.a. avgivet och upptaget värmeflöde,

$$\varepsilon_{k,eff} = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{Q}_k - \dot{Q}_f} \quad (12)$$

Värmeflödet kan beräknas från temperaturerna på vattenbaden som,

$$\dot{Q} = m_v \bar{c} \frac{\Delta\Theta}{\Delta t} \quad (13)$$

där,

m_v = massan vatten,

\bar{c} = värmekapaciteten för vatten, $4,18 \text{ kJ/kgK}$,

$\Delta\Theta$ = temperaturdifferens på vattnet,
 Δt = tidsdifferens.

Med Carnotprocessen fås största möjliga köldfaktor. Den bör lämpligen vara större än ett, och beror av temperaturerna på omgivningen vid kondensor och förångningsidan. I Figur 1 går kylprocessen mellan temperaturerna T_k och T_f , och därifrån erhålls,

$$Q_f = T_f \cdot \Delta S \text{ och } W = (T_k - T_f) \cdot \Delta S \quad (14)$$

Ekvation 11 ger då den Carnotska köldfaktorn,

$$\varepsilon_{kc} = \frac{Q_f}{W} = \frac{T_f}{(T_k - T_f)} \quad (15)$$

Av ekvation 15 framgår att köldfaktorn blir större desto mindre temperaturskillnaden är mellan T_k och T_f . Detta innebär att temperaturskillnaden mellan kondensor och förångningsidan bestämmer hur mycket arbete som behöver tillföras för att omvandla köldmediet från T_f till T_k . Man bör därför inte upprätthålla en lägre temperatur än vad som nödvändigtvis krävs i ett kylskåp. Enligt definitionen av köldfaktor i ekvation 11 och med hjälp av figur 4 blir köldmediets köldfaktor,

$$\varepsilon_{kd} = \frac{Q_f}{W} = \frac{i_b - i_a}{i_c - i_b} \quad (16)$$

Värmefaktorn

Den så kallade värmefaktorn Φ definieras som,

$$\Phi = \frac{Q_k}{W} \quad (17)$$

där,

Q_k = Värme avgiven i kondensorn (även kallat värmealstringen),

W = uträttat arbete på köldmediet.

På samma sätt som ovan kan man definiera en värmefaktor för Carnotprocessen som,

$$\Phi = \frac{Q_k}{W} = \frac{T_k}{(T_k - T_f)} \quad (18)$$

Ett alternativt sätt att definiera en effektiv värmefaktor är m.h.a. tidsberoendet på avgiven och upptagen värme,

$$\Phi_{eff} = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_k - \dot{Q}_f} \quad (19)$$

Verkningsgrad

Processens verkningsgrad är definierad som

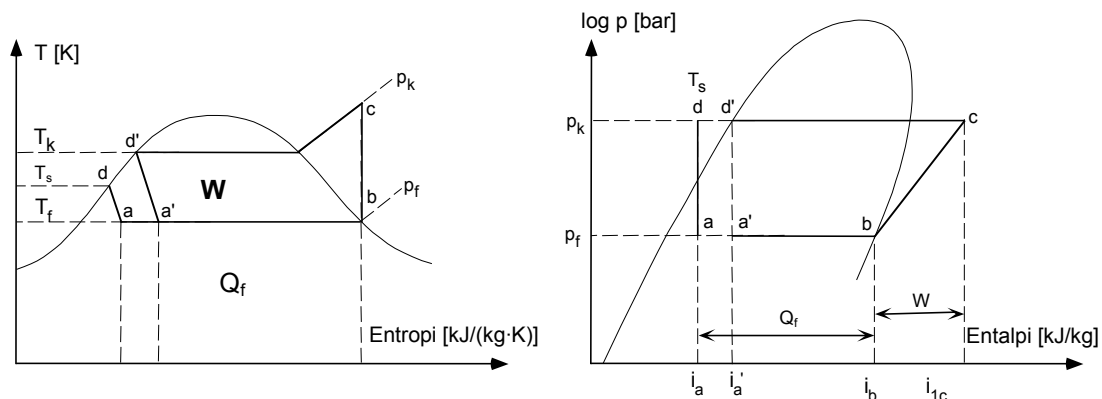
$$\eta_p = \frac{\dot{Q}_k - \dot{Q}_f}{P_{tot}} \quad (20)$$

Anläggningens totala värmefaktor är definierad som

$$\Phi_{anl} = \frac{\dot{Q}_k}{P_{tot}} \quad (21)$$

Underkylningens inverkan

Vid passagen genom expansionsventilen blir en del av köldmediet förångat. Denna förångning gör att värmeöverföringen minskar. Genom att underkyla köldmediet, d.v.s. avge mer värme till kondensorn än vad som motsvarar fullständig kondensering av ångan, kan förångningen reduceras, och därmed värmeöverföringen i förångaren ökas. Ökningen blir lika med den extra värmemängd som förs över vid kondensorsidan. I figur 5(a) och (b) visas innebörden av underkylning i både (S,T)- och (i,log p)-diagram.



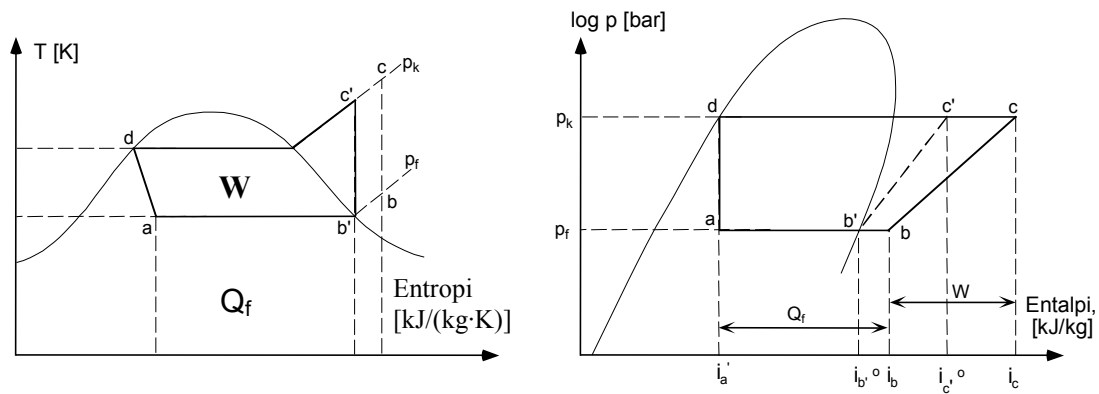
Figur 5(a) och (b). Underkyld kylprocess.

Jämfört med processen utan underkylning, markerad med a'bcd', har förloppet vid expansionsventilen d-a förskjutits åt vänster i diagrammet. Genom att sänka temperaturen från T_k till T_s , fås en minskning av mängden ånga efter ventilen och därmed en ökning av värmeöverföringen. Detta representeras i (S,T)-diagrammet av ytan under a-a' och i Mollier-diagrammet av avståndet för entalpidifferensen $i_a - i_a'$.

Överhettningens inverkan

Vi har tidigare antagit att köldmediet vid kylprocessen lämnar förångaren och kommer in i kompressorn i torrt mättat tillstånd. Ofta inträffar dock att överhettning sker i förångaren, detta innebär att förångningen går mellan a och b i stället för mellan a och b', se figur 6. Köldmediet kommer alltså till kompressorn något överhettat. Och

processen ändras till det utseende som (S,T)- och Mollier-diagrammet har i figur 6. En jämförelse ger att både värmeöverföringen, Q_f , och arbetet, W , ökar. Det går alltså inte med bestämdhet att säga om köldfaktorn, ε_{kd} , ökar eller minskar, det beror på om Q_f eller W ökar mer relativt den andra. Från figur 6(b) går det med andra ord att dra slutsatsen att köldfaktorn vid överhettning kan öka, vara oförändrad, eller minska jämfört med processen utan överhettning



Figur 6(a) och (b). Överkylld process.

Uppgifter

I laborationens första del ska vattentemperatur och effekt mätas som en funktion av tiden. Mätningarna används för att bestämma effektutbyte, de olika värme-, köldfaktorerna och verkningsgraderna i värmepumpsanläggningen.

I den andra delen mäts köldmediets temperatur. De olika processerna i köldcykeln ska ritas in ett Mollierdiagram, vilket kan användas för att beskriva hur kretsprocessen fungerar, och för att bestämma verkningsgrader.

Det är viktigt att förstå hur de olika delarna i försöksuppställningen fungerar och hur värmepumpen används, relatera gärna till Mollierdiagrammet i förklaringen. Observera även i vilket tillstånd köldmediet är på förångnings- respektive kondensorsidan.

1. Vattentemperaturer

Håll i vatten i de båda vattenreservoarerna så att värmeväxlarna blir helt täckta och notera mängden. Använd kranvatten med ca 20°C. Mät alla tryck och temperaturer innan värmepumpen sätts på. Med effektmätaren kan den totala förbrukade effekten mätas.

De mätningar som ska utföras är på kondensorsidan:

Θ_k = vattentemperatur

och på förångarsidan:

Θ_f = vattentemperatur

samt effekten, P_{tot} .

Sätt på värmepumpen och stoppklockan. Mät sedan temperaturer i vattenbadet på kondensor och förångarsidan varannan minut. Avbryt mätningarna efter 30 minuter. Låt pumpen vara på och fortsätt med uppgift 2.

2. Kylmedietemperatur och tryck

För att göra mätningarna på kylmediet måste vattentemperaturen på kondensorsidan sänkas. Detta görs genom att utloppet öppnas och nytt kallt vatten hålls på för att hålla vatten nivån konstant. Notera vad som händer med trycket på kondensorsidan och med temperaturen på kylmediet.

- 1 Placera en hink på en stol under utloppet.
- 2 Fyll en stor bägare med kallt vatten.
- 3 Öppna utloppskranen och håll på vatten. Försök hålla konstant vattennivå i reservoaren.
- 4 Stäng kranen när vattnet i bägaren är slut.

Upprepa 2-4 ca 4 gånger och mät sedan:

Θ_{kut} = kylmediets temperatur på kondensorinloppet

Θ_{kin} = kylmediets temperatur på kondensorutloppet

Θ_{fin} = kylmediets temperatur på förångarinloppet

Θ_{fut} = kylmediets temperatur på förångarrutloppet

p_k = tryck på kondensorsidan

p_f = tryck på förångarsidan

Resultatredovisning

Alla tryck och temperaturer i experiment 1 och 2 ska redovisas i tabeller och för experiment 1 även i tids-temperaturdiagram. Mollierdiagram för experiment 2 ska ritas. Ur dessa diagram och tabeller ska värmepumpens totala verkningsgrad, köldfaktor, värmefaktor (vad skiljer värmefaktorn från köldfaktorn?), Carnotsk köldfaktor, Carnotsk värmefaktor och den totala värmefaktorn beräknas för de olika experimenten. Till detta ska både Mollierdiagrammet samt tids-temperaturdiagrammet användas. Labbrapporten bör innehålla en kortfattad teoridel (redovisa de använda formlerna) en beskrivning av experimentuppställningen och utförandet. Redovisa uppmätta och beräknade värden i tabeller och/eller diagram. Avsluta rapporten med några specifika kommentarer och slutsatser angående de erhållna resultaten. Rapporten kan vara handskriven och inlämnas i ett gemensamt exemplar för varje labbgrupp.

Litteratur

1. H. Alvarez: Energiteknik del 1 och 2.
2. Apparatbeskrivning (PHYWE-3.10).

$Tid\ (s)$	Θ_k	Θ_f	P_{tot}

Θ_{kut}	Θ_{kin}	Θ_{fin}	Θ_{fut}	p_k	p_f