

Utgave: 5. september 2022

**LABORATORIUM I EMNET**

**TFY4165 TERMISK FYSIKK**

**for studenter ved studieprogrammene**

**MTFYMA/MLREAL/BFY**

**NTNU**

**Høsten 2022**



# Forord

Dette heftet inneholder tekster til laboratoriekurset i emnet TFY4165 Termisk fysikk. Hjemmeside for laboratoriekurset i TFY4165 finnes på Blackboard. På disse nettsidene vil studentene finne all nødvendig informasjon om påmeldinger til laboratoriet, timeplaner, romfordelinger osv.

Jonas Persson

August 2022



# Innhold

<b>1</b>	<b>Varmestråling</b>	<b>1</b>
1.1	Innledning og målsetting . . . . .	1
1.2	Apparatur . . . . .	2
1.2.1	Strålingssensoren . . . . .	2
1.2.2	Leslies kube . . . . .	3
1.2.3	Stefan-Boltzmann-lampe . . . . .	3
1.3	Eksperimenter . . . . .	5
1.3.1	Varmestråling fra ulike overflater med lik temperatur. . . . .	5
1.3.2	Stefan-Boltzmanns lov ved høye temperaturer. . . . .	7
1.3.3	Tilleggseksperiment hvis dere har tid: Stefan-Boltzmanns lov ved lave temperaturer. . . . .	8
<b>2</b>	<b>Varmepumpe</b>	<b>11</b>
2.1	Teoretisk bakgrunn . . . . .	11
2.1.1	Termodynamikkens 1. lov . . . . .	12
2.1.2	Varmekraftmaskin . . . . .	12
2.1.3	Kjølemaskin og varmepumpe . . . . .	13
2.1.4	Entalpi . . . . .	13
2.1.5	Varmepumpas oppbygging . . . . .	14
2.1.6	$pV$ -diagram for varmepumpas syklus . . . . .	16

2.1.7	Syklus fremstilt i $pH$ -diagram . . . . .	17
2.2	Forhåndsoppgaver . . . . .	21
2.2.1	Virkningsgrad . . . . .	21
2.2.2	Kretsløpsanalyse . . . . .	22
2.3	Eksperimentelt . . . . .	23
2.3.1	Apparatur . . . . .	23
2.3.2	Innledende observasjoner . . . . .	25
2.3.3	Gjennomføring . . . . .	25
2.3.4	Analyse . . . . .	26
2.3.5	Diskusjon . . . . .	27
2.4	Tillegg: Krav til og klassifikasjon av kjølevæsker . . . . .	28
<b>Bibliografi</b>		<b>31</b>

# Kapittel 1

## Varmestråling

### 1.1 Innledning og målsetting

Alle legemer sender ut energi i form av varmemestråling. Intensiteten i denne termisk eksiterte elektromagnetiske strålingen øker dramatisk med legemets temperatur. Et legeme som absorberer all innkommende stråling, uavhengig av bølgelengden, kalles et svart legeme. Et svart legeme som er i termisk likevekt med omgivelsene, emitterer like mye strålingsenergi som det absorberer. I motsatt fall ville legemets indre energi øke eller avta, dvs legemets temperatur ville endres, men da er jo legemet ikke lenger i termisk likevekt.

Den emiterte varmemestrålingen inneholder “alle mulige” bølgelengder. Plancks strålingslov beskriver hvordan utsendt energi fordeler seg på ulike bølgelengder ved en gitt temperatur  $T$ . Stefan-Boltzmanns lov beskriver hvordan total utsendt energi avhenger av  $T$ :

$$j = \sigma T^4 \quad ; \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}.$$

Her er  $j$  varmemestrålingens intensitet (dvs emitert effekt pr flateenhet), med SI-enhet  $\text{W}/\text{m}^2$ , og  $\sigma$  er Stefan-Boltzmann-konstanten.

Reelle objekter er ikke perfekt svarte legemer. Et svart legeme har emisjonsevne (evt emissivitet)  $\varepsilon = 1$  for alle bølgelengder. Reelle objekter har emisjonsevne  $\varepsilon < 1$ . Eksempelvis er en asfaltert vei ( $\varepsilon = 0.93$ ) mye mer lik et svart legeme enn en plate av polert rustfritt stål ( $\varepsilon = 0.075$ ). For reelle overflater modifiseres Stefan-Boltzmanns lov til

$$j = \varepsilon \sigma T^4.$$

I eksperimentene i denne laboppgaven skal dere

- undersøke ulike overflaters emisjonsevne, og

- verifisere Stefan-Boltzmanns lov.

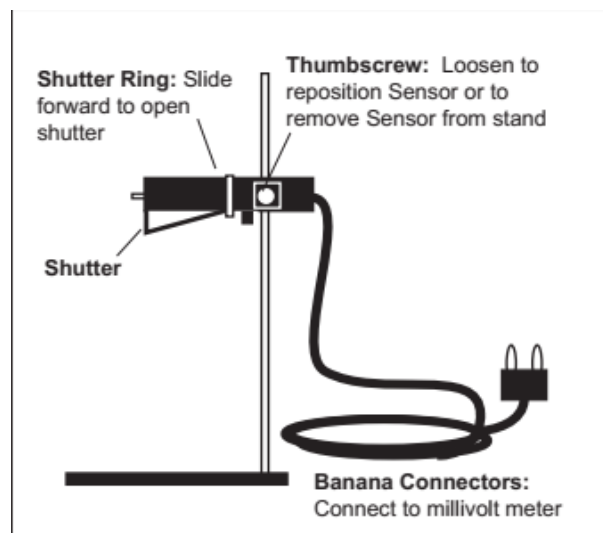
Denne norske labteksten er i all hovedsak basert på PASCOs produktdokument *Thermal-Radiation-System-Manual-TD-8553.pdf* [6]. Notasjonen ligger tett opp til den som brukes i forelesningene i emnet TFY4165 Termisk fysikk høsten 2022.

## 1.2 Apparatet

### 1.2.1 Strålingssensoren

PASCO TD-8553 Radiation Sensor (se figur 1.1) utnytter termoelektrisk effekt og genererer en elektrisk spenning  $V_s$  som er proporsjonal med netto absorbert mengde strålingsvarme. For en gitt intensitet er den genererte spenningen praktisk talt uavhengig av strålingens bølgelengdeinnhold i det infrarøde området (fra 0.5 til 40  $\mu\text{m}$ ). Spenningen varierer typisk fra noen mikrovolt til ca 100 mV. Sensoren kan holdes i hånda eller monteres på et stativ, for mer nøyaktig posisjonering.

Apparatet har en fjærbasert lukkemekanisme som skal holdes lukket underveis, unntatt når målinger foretas. Dette minimerer variasjoner i referansetemperaturen inne i sensoren, slik at sammenlignbare intensitetsmålinger kan oppnås. De to metallstavene beskytter sensoren og kan dessuten brukes for å plassere sensoren i samme avstand fra en strålingskilde gjentatte ganger.

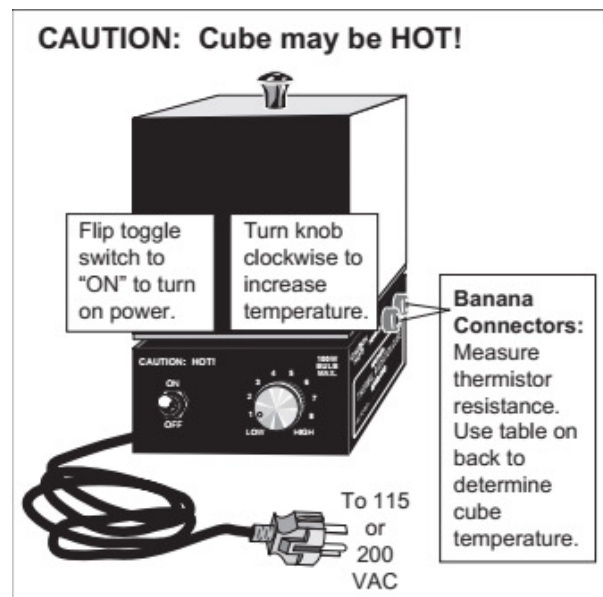


Figur 1.1: Varmestrålingssensoren. (Fra:[6])



### 1.2.2 Leslies kube

TD-8554A Radiation Cube (se figur 1.2) har fire ulike overflater som kan varmes opp fra romtemperatur til ca 120 °C. Kuben varmes opp innenfra med en 100 W lyspære. Kubens vegger leder varme godt, slik at dens temperatur er den samme overalt ved et gitt tidspunkt. Kubens temperatur måles ved å koble til et ohmmeter i THERMISTOR-kontaktene. Termistoren, en motstand med temperaturavhengig resistans  $R_L$ , er bygget inn i kubens ene hjørne. Motstanden  $R_L$  måles, hvoretter tabellen i figur 1.3 brukes for å regne om til absolutt temperatur  $T$ .



Figur 1.2: Leslies kube.(Fra:[6])

### 1.2.3 Stefan-Boltzmann-lampe

TD-8555 Stefan-Boltzmann Lamp (se figur 1.4) er en varmestralingskilde med høy temperatur. Den kan brukes til å verifisere Stefan-Boltzmanns lov. En høy temperatur forenkler analysen fordi varmestralingen fra omgivelsene (som har mye lavere temperatur) kan neglisjeres. Glødetråden i lampen kan med god tilnærmelse betraktes som en punktformet varmekilde. Ved å variere tilført effekt (maksimal spenning 13 V, strømstyrke mellom 2 A og 3 A) kan temperaturen i glødetråden varieres opp mot 3000 °C.

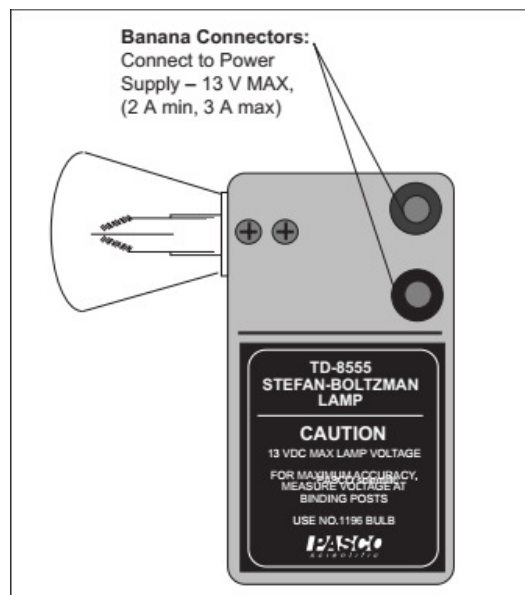
NB: Spenningen over lampen må IKKE overstige 13 V. Det vil ødelegge glødetråden.

Temperaturen til glødetråden fastlegges gjennom nøyaktige målinger av spenningen over lampen og strømmen gjennom den. Ohms lov gir nå glødetrådets motstand  $R$ . For moderate temperaturvariasjoner i et metall øker (som kjent fra FY1003) motstanden lineært med temperaturen,

$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)] ,$$

Resistance versus Temperature for the Thermal Radiation Cube									
Therm. Res. (Ω)	Temp. (°C)	Therm. Res. (Ω)	Temp. (°C)	Therm. Res. (Ω)	Temp. (°C)	Therm. Res. (Ω)	Temp. (°C)	Therm. Res. (Ω)	Temp. (°C)
207,850	10	66,356	34	24,415	58	10,110	82	4,615.1	106
197,560	11	63,480	35	23,483	59	9,767.2	83	4,475.0	107
187,840	12	60,743	36	22,590	60	9,437.7	84	4,339.7	108
178,650	13	58,138	37	21,736	61	9,120.8	85	4,209.1	109
169,950	14	55,658	38	20,919	62	8,816.0	86	4,082.9	110
161,730	15	53,297	39	20,136	63	8,522.7	87	3,961.1	111
153,950	16	51,048	40	19,386	64	8,240.6	88	3,843.4	112
146,580	17	48,905	41	18,668	65	7,969.1	89	3,729.7	113
139,610	18	46,863	42	17,980	66	7,707.7	90	3,619.8	114
133,000	19	44,917	43	17,321	67	7,456.2	91	3,513.6	115
126,740	20	43,062	44	16,689	68	7,214.0	92	3,411.0	116
120,810	21	41,292	45	16,083	69	6,980.6	93	3,311.8	117
115,190	22	39,605	46	15,502	70	6,755.9	94	3,215.8	118
109,850	23	37,995	47	14,945	71	6,539.4	95	3,123.0	119
104,800	24	36,458	48	14,410	72	6,330.8	96	3,033.3	120
100,000	25	34,991	49	13,897	73	6,129.8	97	2,946.5	121
95,447	26	33,591	50	13,405	74	5,936.1	98	2,862.5	122
91,126	27	32,253	51	12,932	75	5,749.3	99	2,781.3	123
87,022	28	30,976	52	12,479	76	5,569.3	100	2,702.7	124
83,124	29	29,756	53	12,043	77	5,395.6	101	2,626.6	125
79,422	30	28,590	54	11,625	78	5,228.1	102	2,553.0	126
75,903	31	27,475	55	11,223	79	5,066.6	103	2,481.7	127
72,560	32	26,409	56	10,837	80	4,910.7	104	2,412.6	128
69,380	33	25,390	57	10,467	81	4,760.3	105	2,345.8	129

Figur 1.3: Motstand  $R_L$  vs temperatur  $T$  for termistoren bygget inn i Leslies kube. (Fra:[6])



Figur 1.4: Stefan-Boltzmann-lampe. (Fra:[6])

slik at wolframtrådens temperatur  $T$  kan beregnes med uttrykket

$$T = T_0 + \frac{R - R_0}{\alpha R_0}.$$

Her er  $R_0$  motstanden ved en valgt referansetemperatur  $T_0$  (vanligvis romtemperatur), og  $\alpha = 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  er temperaturkoeffisienten til wolfram.

For større temperaturvariasjoner er  $\alpha$  ikke lenger konstant, og uttrykket ovenfor er ikke tilstrekkelig nøyaktig. Temperaturen til wolframtråden bestemmes nå slik:

- Mål først motstanden  $R_0$  meget nøyaktig ved romtemperatur  $T_0$  (ca 300 K) med en wheatstone-bro. En liten feil i  $R_0$  vil føre til en stor feil i de beregnede høye glødetrådtemperaturene.
- Når glødetråden er varm, mål spenning over og strøm gjennom tråden og beregn motstanden  $R$  med Ohms lov.
- Beregn relativ resistans  $R/R_0$ .
- Bruk tabellen i figur 1.5 til å fastlegge glødetrådens temperatur  $T$ . Se også figur 1.6.

Table 2 Temperature and Resistivity for Tungsten

R/R <sub>300K</sub>	Temp °K	Resistivity μΩ cm	R/R <sub>300K</sub>	Temp °K	Resistivity μΩ cm	R/R <sub>300K</sub>	Temp °K	Resistivity μΩ cm	R/R <sub>300K</sub>	Temp °K	Resistivity μΩ cm
1.0	300	5.65	5.48	1200	30.98	10.63	2100	60.06	16.29	3000	92.04
1.43	400	8.06	6.03	1300	34.08	11.24	2200	63.48	16.95	3100	95.76
1.87	500	10.56	6.58	1400	37.19	11.84	2300	66.91	17.62	3200	99.54
2.34	600	13.23	7.14	1500	40.36	12.46	2400	70.39	18.28	3300	103.3
2.85	700	16.09	7.71	1600	43.55	13.08	2500	73.91	18.97	3400	107.2
3.36	800	19.00	8.28	1700	46.78	13.72	2600	77.49	19.66	3500	111.1
3.88	900	21.94	8.86	1800	50.05	14.34	2700	81.04	26.35	3600	115.0
4.41	1000	24.93	9.44	1900	53.35	14.99	2800	84.70			
4.95	1100	27.94	10.03	2000	56.67	15.63	2900	88.33			

Figur 1.5: Temperatur vs absolutt og relativ resistivitet for wolfram.(Fra:[6])

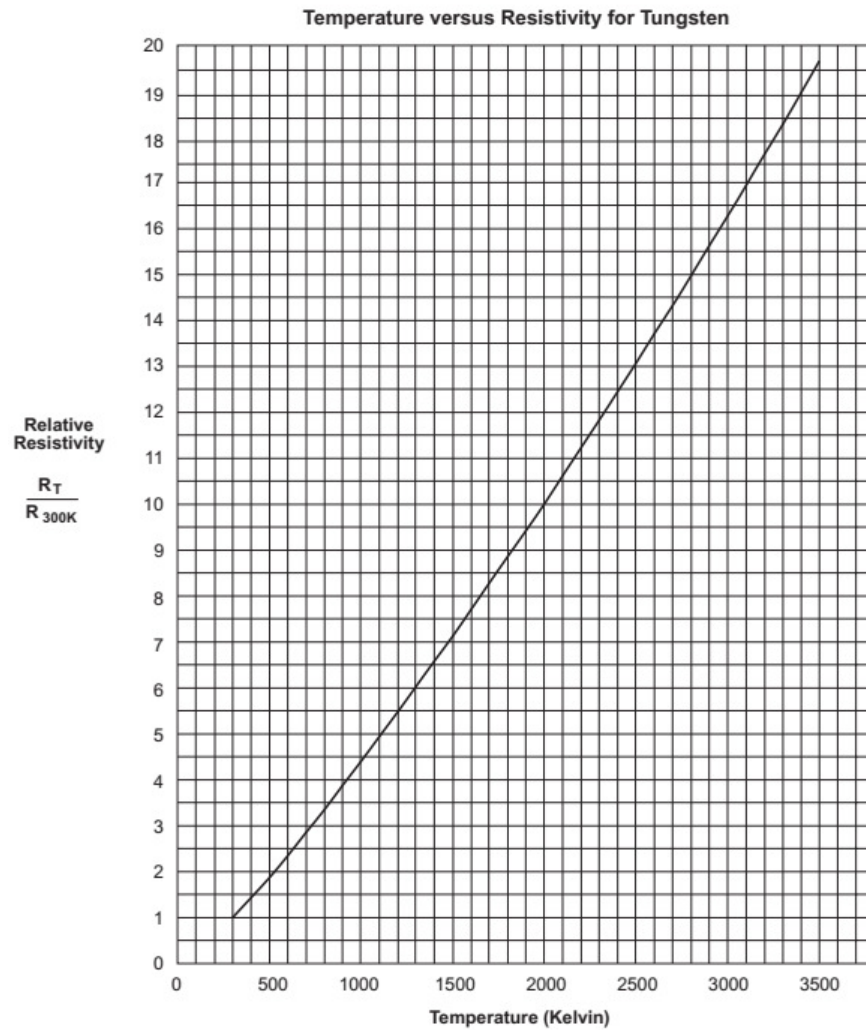
## 1.3 Eksperimenter

### 1.3.1 Varmestråling fra ulike overflater med lik temperatur.

Vi skal måle emisjonsevnen til de fire overflatene på Leslies kube ved ulike temperaturer. Den svarte overflaten har størst emisjonsevne. Vi betrakter denne som et svart legeme og beregner emisjonsevnen til de tre andre overflatene relativt den svarte.

Varmestrålingssensoren plasseres ganske nært inntil kuben, se figur 1.7. Et digitalt multi-meter (DMM) kobles til kuben (for måling av termistorens motstand  $R_L$ ; måleområde  $\Omega$ ). Et annet DMM kobles til strålingssensoren (for måling av generert spenning  $V_s$ , måleområde mV).

La kuben stå på effekt *high* inntil DMM viser ca 40 k $\Omega$ . Skru deretter effekten ned til 5. Når kuben har oppnådd termisk likevekt (konstant temperatur), vil motstanden fluktuere



**Figur 1.6:** Temperatur vs relativ resistivitet for wolfram. (Fra:[6])

omkring en forholdsvis konstant verdi. Bruk denne til å bestemme kubens temperatur. Mål deretter emittert stråling fra hver av kubens fire overflater.

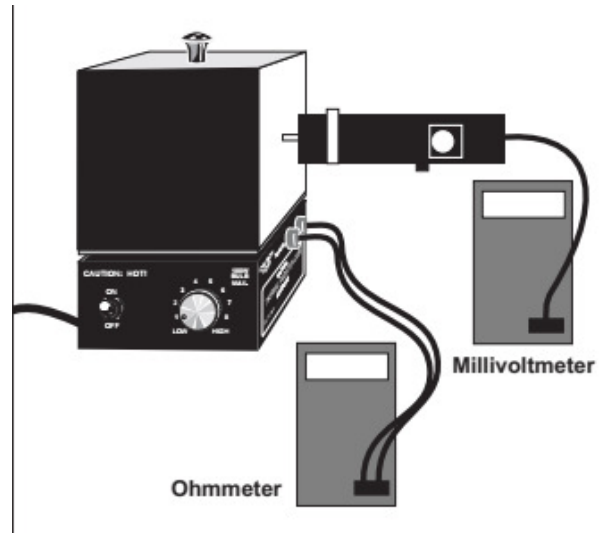
Gjør tilsvarende målinger for i alt fire ulike effektinnstillinger, for eksempel *5*, *6.5*, *8* og *high*.

Spørsmål:

- Er relativ mengde utsendt strålingsenergi uavhengig av temperaturen?
- Et objekt som absorberer varmemstråling godt vil også ha høy emisjonsevne. Er målingene i tråd med dette?

Tilleggsforsøk:

Plasser sensoren ca 5 cm fra den svarte overflaten på kuben og mål intensiteten. Plasser

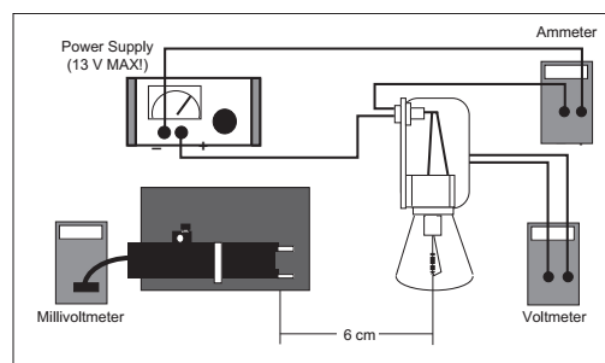


**Figur 1.7:** Eksperimentelt oppsett for måling av ulike overflaters emisjonsevne. (Fra:[6])

en skive av vanlig glass mellom sensoren og kubens. I hvilken grad blokkerer glasset for varmestrålingen? Avhenger dette av temperaturen?

### 1.3.2 Stefan-Boltzmanns lov ved høye temperaturer.

I dette eksperimentet skal vi måle intensiteten i varmestrålingen fra Stefan-Boltzmann-lampen for ulike høye temperaturer. Målingene skal sammenlignes med Stefan-Boltzmanns lov. Det aller meste av energien som emitteres fra lampen kommer fra glødetråden. Trådens temperatur kan bestemmes med metoden beskrevet ovenfor.



**Figur 1.8:** Eksperimentelt oppsett for måling av varmestråling fra glødetråden i Stefan-Boltzmann-lampen. (Fra:[6])

NB: Vi gjentar at spenningen over lampen ikke må overskride 13 V. Da blir glødetråden ødelagt.

- Før du skrur på lampen: Mål  $T_0$ , romtemperaturen (i kelvin) og  $R_0$ , glødetrådets motstand ved romtemperatur. Resistansen er liten (ca  $0.2\Omega$ ), men kan måles nøyaktig med en såkalt wheatstone-bro. Denne finner dere i labsalen, med instruksjoner.
- Still opp apparaturen som vist i figur 1.8. Voltmeteret skal kobles direkte til pinnene på lampen. Sensoren skal være i samme høyde som glødetråden, med framsida av sensoren omtrent 6 cm unna glødetråden. Ingen andre objekter enn lampen skal finne seg i nærheten av sensoren.
- Skru på strømforsyningen. Still inn spenningen  $V$  i trinn på ca 1 V og les av strømstyrken  $I$ , samt spenningen  $V_s$  (*Rad*) generert av sensoren.

NB: Gjør raske målinger. Mellom hver måling plasserer dere begge skivene med isopor mellom lampen og sensoren, med den sølvblanke siden vendt mot lampen, slik at temperaturen i sensoren holder seg mest mulig konstant.

## Dataanalyse

Bruk strøm- og spenningsmålingene til å bestemme motstanden i tråden for hver innstilling av den påtrykte spenningen. Bruk tabellen eller grafen i apparaturavsnittet til å finne temperaturen. Plott strålingsintensiteten (dvs spenningen  $V_s$  generert av sensoren) som funksjon av glødetrådets temperatur.

Spørsmål:

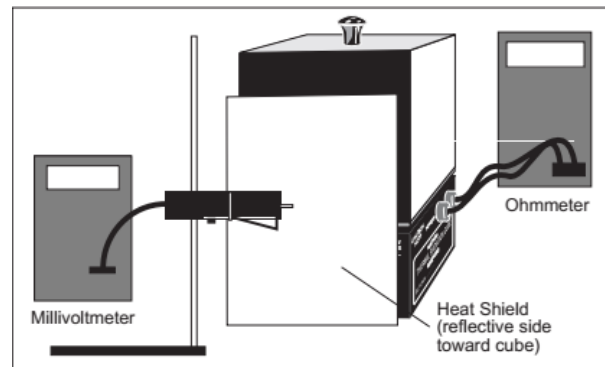
- Hvordan avhenger sensorspenningen  $V_s$  av glødetrådets temperatur  $T$ ? Er denne sammenhengen gyldig over hele det aktuelle temperaturområdet?
- Er målingene i tråd med Stefan-Boltzmanns lov?
- Er det andre varmestralingskilder enn glødetråden som kan tenkes å ha påvirket målingene? I hvilken grad forventer dere at disse kildene påvirker resultatene?

### 1.3.3 Tilleggseksperiment hvis dere har tid: Stefan-Boltzmanns lov ved lave temperaturer.

Detektoren i sensoren genererer en spenning  $V_s$  som er proporsjonal med *netto* utsendt varmestraling, dvs

$$V_s \sim j_{\text{net}} = j_T - j_d = \sigma(T^4 - T_d^4).$$

Her er  $T$  temperaturen til det strålende objektet mens  $T_d$  er detektorens temperatur. Så lenge dere er nøye med å skjerme sensoren mot stråling når målinger ikke foretas, vil  $T_d$  holde seg nær romtemperatur.



**Figur 1.9:** Eksperimentelt oppsett for måling av varmestråling fra en av Leslie-kubens overflater. (Fra:[6])

- Still opp apparaturen som vist i figur 1.9. Gjør målinger med den svarte overflaten. Sensoren skal peke rett inn mot sentrum av overflaten. Sensorens frontside skal orienteres parallelt med den svarte overflaten, i 3-4 cm avstand.
- Med kuben avslått, mål  $R_0$ , termistorens resistans ved romtemperatur  $T_0$ .
- Skjerm sensoren fra kuben med det reflekterende varmeskjoldet, med den reflekterende siden vendt mot kuben.
- Skru på kuben. Still inn effekten til styrke 10.
- Når termistorens resistans  $R$  indikerer at kubens temperatur er ca  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  over romtemperatur, skruer dere ned effekten slik at temperaturen øker langsomt. Les av og noter sammenhørende verdier for termistormotstanden  $R$  og sensorspenningen  $V_s$ . Ta vekk varmeskjoldet bare et kort øyeblikk om gangen og mål  $R$  og  $V_s$  så samtidig som mulig.
- Med varmeskjoldet på plass, skru igjen effekten opp til styrke 10. Når temperaturen har steget ytterligere ca  $12 - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , gjentar dere målinger som i forrige kulepunkt.
- Gjenta denne prosedyren med ca  $12 - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  intervaller, inntil kubens maksimums-temperatur er nådd, ca  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Vurder målingene i lys av Stefan-Boltzmanns lov og uttrykket  $V_s \sim \sigma(T^4 - T_d^4)$ .

Spørsmål:

- Hva er den målte sammenhengen mellom  $V_s$  og  $T$ ? Er Stefan-Boltzmanns lov også oppfylt ved lave temperaturer?





# Kapittel 2

## Varmepumpe

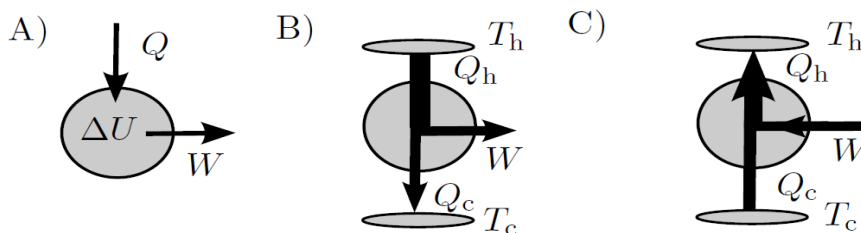
Du skal i denne laboratorieoppgaven:

- få kunnskap om og erfaring med termodynamiske kretsprosesser,
- analysere kretsprosessen i ei varmepumpe,
- måle virkningsgraden til ei varmepumpe.

### 2.1 Teoretisk bakgrunn

Varmepumpa er et eksempel på hvordan vi utnytter termodynamiske prinsipper til å forbedre hverdagen. Varmepumpa kan beskrives som et modifisert kjøleskap hvor vi ikke er primært interessert i avkjølingseffekten men isteden benytter den varmen som kjøleskapet avgir.

Tanken om å bruke termodynamiske prinsipper til oppvarming er ikke ny, dette ble foreslått for over 150 år siden. Basisteknologien er heller ikke ny ettersom industrielle kjølesystemer har vært i bruk siden 1850 og kjøleskap for forbrukere ble vanlige rundt 1930. Overskudd av billig elektrisk og fossil energi i sammenheng med dyr kjøleteknologi gjorde imidlertid at varmepumpa inntil ganske nylig ikke var interessant for vanlige forbrukere. Dette har endret seg i løpet av de siste årene, og varmepumpa er i dag svært aktuell som strømsparende element hvor man trekker varmeenergi fra et vannreservoar, fra jorda eller fra lufta og bruker denne energien til å varme opp boliger. Det geniale ligger i at man bruker termodynamiske prinsipper til å ta varme fra et kaldt (i forhold til innelufta) medium og deretter bruker denne varmen til å vedlikeholde en høyere temperatur i et annet medium.



**Figur 2.1:** Energifyttdiagram som viser: (A) Termodynamikkens 1. lov, (B) varmekraftmaskin og (C) kjølemaskin/varmepumpe.

### 2.1.1 Termodynamikkens 1. lov

Selve grunnloven for termodynamikken – termodynamikkens 1.lov om energiens bevaring – er vist i Figur 2.1A. Varme  $Q$  inn i systemet går med til 1) å øke indre energi  $\Delta U$ , 2) å utføre et arbeid  $W$ . Første hovedsetning i termodynamikken sier at for enhver prosess der varme tilføres og arbeid utføres på et system, vil netto tilført energi være lik økningen av systemets indre energi:

$$\Delta U = Q - W. \quad (2.1)$$

Fortegnsregel brukt i ligning (2.1) og av de fleste fysikere: Varme  $Q$  positiv inn og arbeid  $W$  positiv ut av systemet.

### 2.1.2 Varmekraftmaskin

Figur 2.1B viser energifyten i en varmekraftmaskin. Maskinen (som i det senere også kalles systemet) trekker ut en viss varme  $Q_h$  fra et reservoar med høy temperatur  $T_h$ , produserer arbeidet  $W$  og gir i tillegg fra seg en mindre varmemengde  $Q_c$  til et reservoar med lav temperatur  $T_c$ . En varmekraftmaskin må som alle termodynamiske maskiner være en syklisk maskin. Ifølge termodynamikkens 2. lov er det ikke mulig for en syklisk arbeidende maskin å omdanne all varme til arbeid. Derfor kan ikke  $Q_c = 0$  i Figur 2.1B.

En viktig faktor når vi omtaler systemer som er basert på varmekraft er virkningsgraden til prosessen, det vil si hvor mye nytte får vi ut i forhold til kostnaden til det vi putter inn i prosessen.

Virkningsgraden  $\eta$  for en varmekraftmaskin er derfor definert som

$$\eta = \frac{W}{Q_h} = \frac{\text{nytte}}{\text{kostnad}}. \quad (2.2)$$

### 2.1.3 Kjølemaskin og varmepumpe

Figur 2.1C viser energiflyten i et kjøleskap eller ei varmepumpe. I kjøleskapet bruker vi energi  $W$  til å fjerne en varme  $Q_c$  fra kjøleskapet som har temperatur  $T_c$ . Varmen  $Q_h$  avgis til romlufta med temperatur  $T_h$ . For å få effektiv kjøling bør naturligvis  $Q_c$  være så stor som mulig i forhold til den anvendte energi  $W$ , og vi definerer en kjølefaktor  $\epsilon_R$  (subskript R står her for refrigerator)

$$\epsilon_R = \left| \frac{Q_c}{W} \right| = \frac{\text{nytte}}{\text{kostnad}}. \quad (2.3)$$

For varmepumpa gjør vi egentlig det samme, idet vi her bruker den tilførte energien  $W$  til å trekke varmen  $Q_c$  fra et rimelig kjølig medium ved temperatur  $T_c$  (f.eks. havvann eller uteluft) og overføre den som varme  $Q_h$  til et varmere medium ved temperatur  $T_h$  (inneluft). Her er vi interessert i at  $Q_h$  blir så stor som mulig, og effektfaktoren  $\epsilon_{HP}$  (subskript HP står her for Heat Pump) for varmepumpa blir

$$\epsilon_{HP} = \left| \frac{Q_h}{W} \right| = \frac{\text{nytte}}{\text{kostnad}}. \quad (2.4)$$

Den praktiske virkningsgraden for en varmeprosess som drives mellom to reservoar med temperaturer  $T_c$  og  $T_h$ , er avhengig av mange faktorer. Det kan ut fra termodynamikkens 2. lov vises at ingen av maskinene kan ha virkningsgrad høyere enn virkningsgraden til en Carnotmaskin. Når maskinen er ei varmepumpe, får vi

$$\epsilon_{HP, \text{ maks}} = \epsilon_{HP, C} = \frac{T_h}{T_h - T_c} = \frac{T_h}{\Delta T}. \quad (2.5)$$

Denne relasjonen er utpreget teoretisk, men tendensen viser det beklagelige faktum at en luft-luft varmepumpe vil miste effektivitet når kuldegradene virkelig setter inn og  $\Delta T$  blir stor, mens en vann-luft(vann) varmepumpe fremdeles vil være effektiv ettersom temperaturen i et stort vannreservoar som regel endrer seg forholdsvis lite i løpet av vinteren.

Merk at virkningsgraden for en varmekraftmaskin alltid er mindre enn 1.0 mens for en varmepumpe er den alltid større enn 1.0.

### 2.1.4 Entalpi

Når vi analyserer bestemte typer termodynamiske prosesser, spesielt i kraftproduksjon og kjøling, støter vi ofte på kombinasjonen  $U + pV$  der  $U$  = indre energi,  $p$  = trykk og  $V$  = volum. Denne kombinasjonen blir definert som entalpien  $H$ :

$$H \stackrel{\text{def}}{=} U + pV. \quad (2.6)$$

Entalpien er spesielt nyttig for isobare prosesser, idet tilført varme  $Q$  i sin helhet går til økt entalpi:

$$\Delta H \stackrel{\text{konst } p}{=} \Delta U + p\Delta V = \Delta U + W = Q, \quad (2.7)$$

der siste overgang er fra 1. hovedsetning i ligning (2.1). Nødvendig varme for ulike termodynamiske prosesser (smeltevarme, kondensasjonsvarme etc.) oppgis gjerne ved  $\Delta H$  fordi slike prosesser vanligvis foregår ved konstant trykk  $p$  (oftest 1 atmosfære). Tilført varme går altså med til å øke den indre energien  $U$  pluss å gjøre ytre arbeid  $p\Delta V$ , summert i  $\Delta H$ .

Med fortegnskonvensjonen i Figur 2.1A vil vi ha:

Fordampingsvarme:  $Q = \Delta H > 0$  (varme inn i systemet)

Kondensasjonsvarme:  $Q = \Delta H < 0$  (varme ut av systemet)

### 2.1.5 Varmepumpas oppbygging

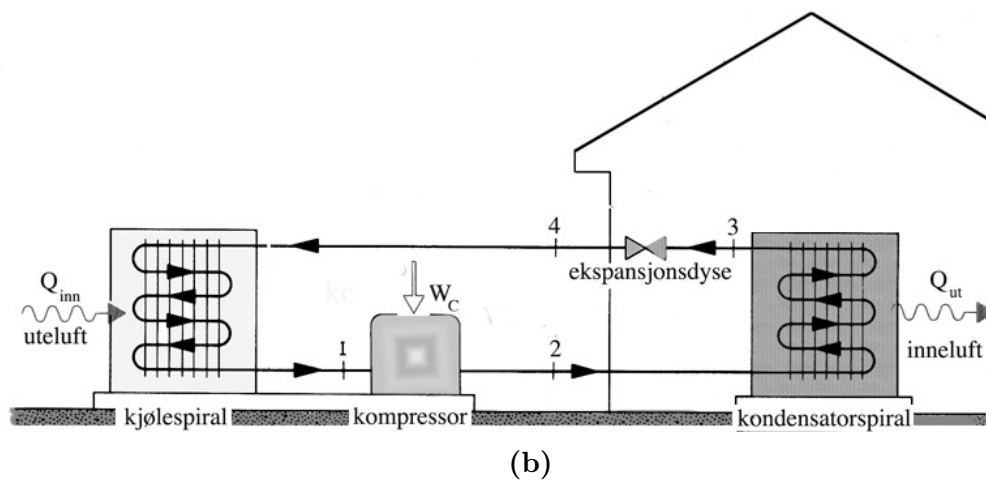
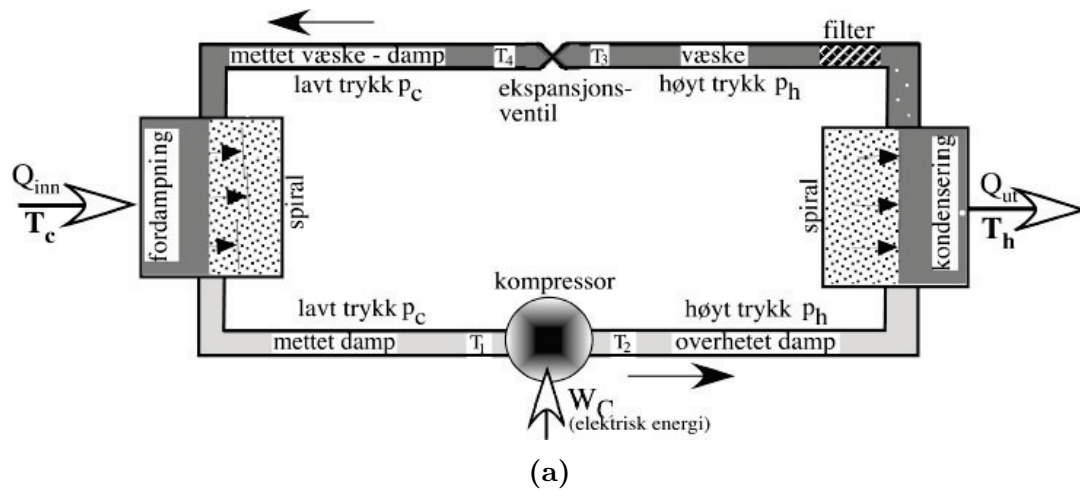
Den prinsipielle oppbyggingen av varmepumpa er vist i Figur 2.2a. Virkemåten er basert på at et kjølemedium vekselvis fordampes og kondenserer.

For å forstå varmepumpas virkemåte må vi ha i minne definisjonen av varme: Varme er en strøm av energi mellom to systemer som skyldes temperaturforskjell mellom systemene.

La oss først se på fordampingen (kokingen). I fordamperenheten tilføres kjølemediet varme  $Q_{\text{inn}}$  slik at det først varmes opp til kokepunktet og så fordampes (koker). Det meste av varmen går med til fordampingen. Trykket må være så lavt at kokepunktet ligger lavere enn temperaturen til omgivelsene (lufta eller vannet). Det lave trykket forårsakes av en ekspansjonsventil (dyse) foran fordamperenheten.

Så til kondensasjonen: I kondensasjonsenheten strømmer varme  $Q_{\text{ut}}$  fra kjølemediet til omgivelsene. Gassen avkjøles til kokepunktet (doggpunktet) og vil så kondensere. Det meste av energien frigjøres p.g.a. kondensasjonen. Trykket må være så høyt at kokepunktet ligger høyere enn temperaturen til omgivelsene. Det høye trykket besørges av en kompressor mellom fordamperenheten og kondensasjonsenheten.

Oppbyggingen av en luft-luft varmepumpe til boligoppvarming er vist i Figur 2.2b. Her brukes en kraftig vifte (ikke vist på figuren) til å føre store luftmengder med uteluft over fordamperenheten (merket 'kjølespiral'). Varmeinnholdet i denne lufta blir brukt til å koke (fordampe) kjølemediet. Kompressoren øker trykket, og den overopphetede dampen føres inn i huset hvor den kondenserer i kondensatorspiralen med påfølgende varmeavgivelse. Denne spiralen er plassert foran en vifte som sender den oppvarmede lufta inn i rommet.



**Figur 2.2:** (a) Prinsippskisse av varmepumpe. (b) Konstruksjonen av en luft-til-luft varmepumpe. Fordamperenheten er markert med 'kjølespiral', et navn som henger igjen fra kjøleterminologien.

**Oppsummert:**

Varme pumpes fra kalde til varme omgivelser når følgende er oppfylt:

1. I fordamperenheten (“kjølespiralen”) må temperaturen i kjølemediet være **lavere** enn temperaturen i omgivelsene. P.g.a. temperaturforskjellen transporteres varme fra omgivelsene til kjølemediet, varmen gir fordamping.
2. I kondensasjonsenheten (“kondensatorspiralen”) må temperaturen i kjølemediet være **høyere** enn temperaturen i omgivelsene. P.g.a. temperaturforskjellen transporteres varme fra kjølemediet til omgivelsene slik at kjølemediet kondenserer.
3. Vi ser av pkt. 1 at på fordampersiden må kjølemediets kokepunkt ligge godt **under** omgivelsenes temperatur. Koking oppnås ved at trykket reduseres til under damptrykket ved den aktuelle temperaturen.<sup>1</sup>
4. Vi ser av pkt. 2 at på kondensatorsiden må kjølemediets kokepunkt ligge godt **over** omgivelsenes temperatur. Dette oppnås ved å ha tilstrekkelig **høyt** trykk.

Hvilke krav vi må stille til kjølemediet vil bli detaljert i avsnitt 2.4.

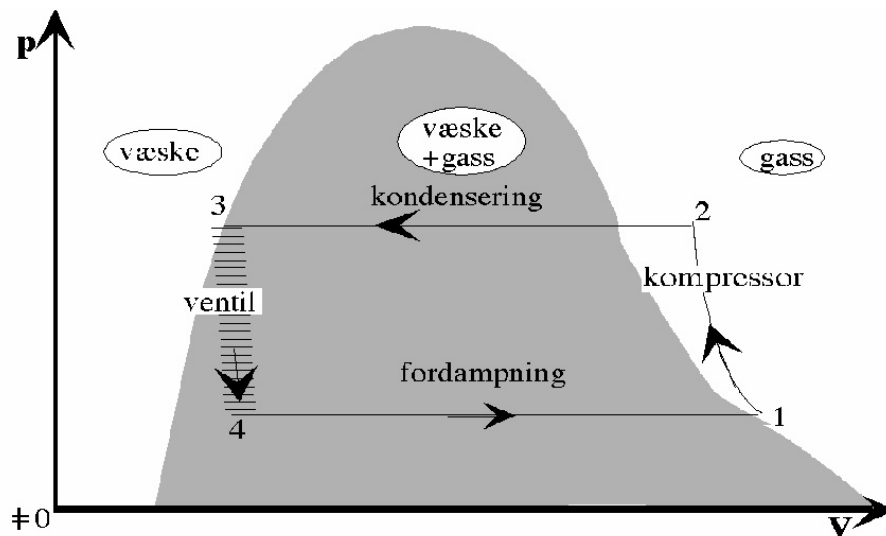
### 2.1.6 $pV$ -diagram for varmepumpas syklus

Vi skal først vise hvordan varmepumpas termodynamikk fremstilles som funksjon av trykk og volum, Figur 2.3.<sup>2</sup>

Den grå “haugen” som kommer opp på midten representerer området hvor væske og damp kan sameksistere. Til venstre for området er kjølemediet i væskeform, mens det til høyre er i gassform. I tilstand 2 er kjølemediet i dampform. Dampen avkjøles til den når doggpunktet og kondenseres langs 2–3. Kondensasjonsvarme avgis, og i tilstand 3 er alt kjølemediet i væskeform. Langs 3–4 synker trykket, og noe av væsken fordampes. Denne delen av prosessen er ikke reversibel (som antydnet med en stipling), men ettersom vi kjenner start- og sluttverdier til trykk og volum betyr dette ikke noe for analysen. Systemet ekspanderer deretter langs 4–1 under konstant trykk, og mesteparten av mediet er da fordampet ved tilførsel av varme. Dampen komprimeres til slutt langs 1–2. Temperaturen øker, og eventuelt resterende væske fordampes.

<sup>1</sup>Det klassiske eksempel på dette er at vi vil få vann i en tett beholder til å koke ved romtemperatur ved å pumpe ut lufta over vannet. Vann vil koke ved ca.  $+83\text{ }^{\circ}\text{C}$  ved 0.5 atm som tilsvarer trykket ved 5000 m.o.h., mens det vil koke ved ca.  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ved 0.05 atmosfærer som tilsvarer litt over 20000 m.o.h. Det aktuelle kjølemediet vi skal benytte i denne oppgaven koker rundt  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ved 1.0 atmosfære.

<sup>2</sup>Legg merke til at vi her bare ser på den delen av diagrammet for kjølemediet som er interessant for prosessen, slik at her representerer ikke origo nullpunktet verken for trykket eller volumet. Hvis vi ønsker å få med mest mulig av ekstremal-områdene, må vi tegne i log  $p$ -skala. Dette gjøres nesten alltid i tekniske datablad.

Figur 2.3:  $pV$ -diagram for varmepumpe.

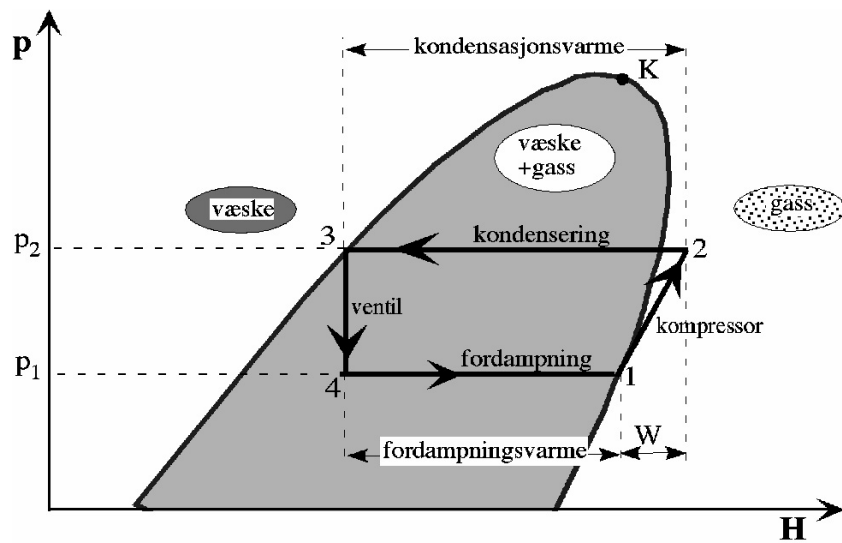
### 2.1.7 Syklus fremstilt i $pH$ -diagram

Vi vil først vise syklusen i et forenklet  $pH$ -diagram i Figur 2.4. Før vi går løs på selve syklusen kan vi knytte noen kommentarer til selve diagrammet. Som for  $pV$ -diagrammet viser det grå området hvor kjølemediet forekommer som en blanding av væske og gass (damp). Innenfor dette området kan det trekkes kurver for konstant relativ andel av damp – dette er ikke gjort her men vil finnes på det noe mer omfattende diagrammet i Figur 2.5. Grenselinja som avgrenser området til venstre er kurven for mettet væske, eller kokepunktlinja. Til venstre for denne linja forekommer mediet bare som væske. Grenselinja til høyre representer doggpunktlinja. Til høyre for denne linja eksisterer mediet bare i gassfase. Kokepunkt- og doggpunktlinjene møtes i det kritiske punkt  $K$  – over dette punktet blir gass og væske uadskillelige tilstander.

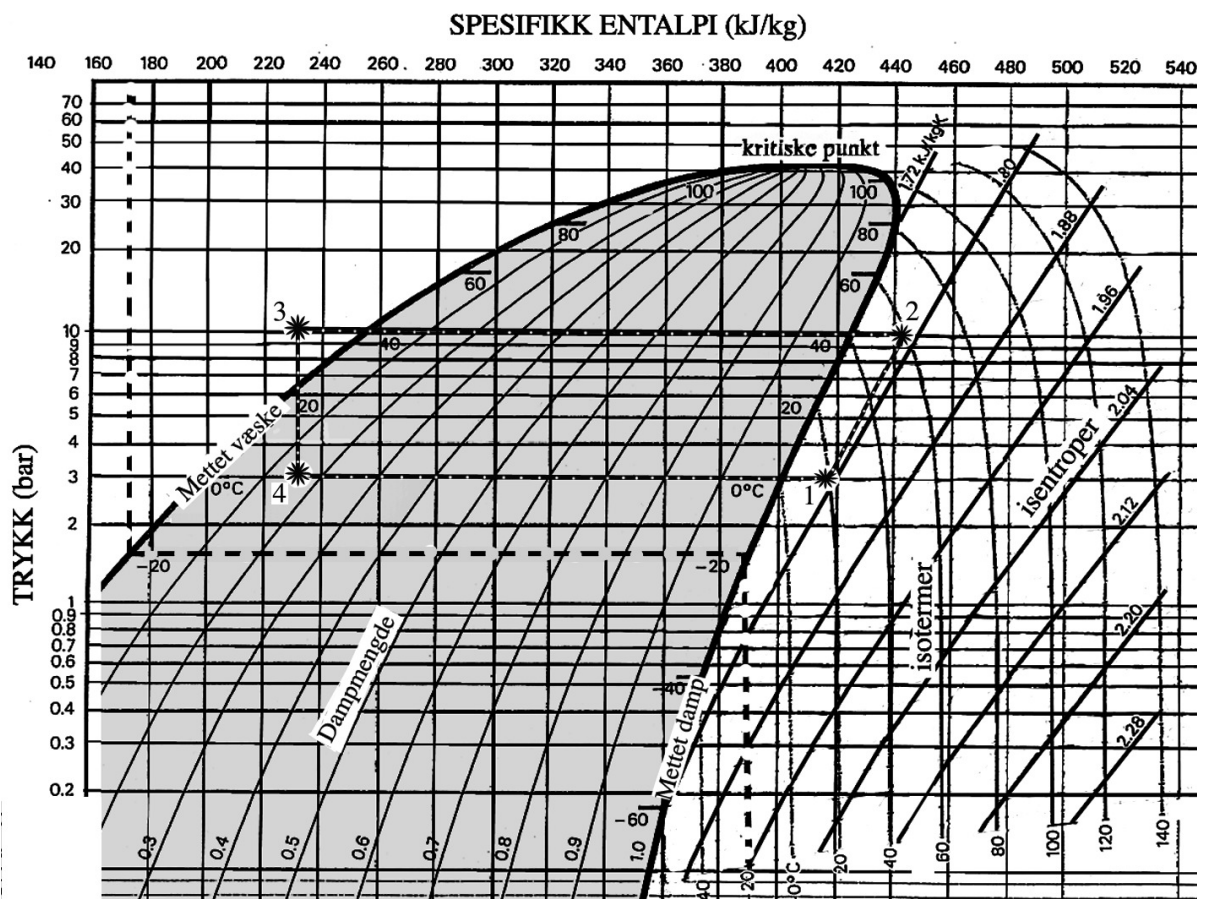
Følg med i det forenklede diagrammet i Figur 2.4. Syklusen 1–2–3–4–1 er tegnet inn i diagrammet med piler som angir retningen av prosessen. Vi ser at syklusen blir ganske enkel i dette diagrammet. Den ligger mellom to isobarer  $p_1$  og  $p_2$  (de to horisontale linjene), og overgangen skjer ved en såkalt isentrop 1–2 og en isentalp 3–4.<sup>3</sup> I prosessene 1–2 og 3–4 skjer kompresjon og ekspansjon av kjølemediet så raskt at ingen varme utveksles med omgivelsene,  $Q = 0$ . Prosessen 3–4, hvor kjølevæsken ekspanderer gjennom en ventil er ikke reversibel. Likevel er entalpien bevart, noe som gjør  $pH$ -diagrammet spesielt nyttig til å studere kretsprosessen i en varmepumpe.

Punkt 1 tilsvarer tilstanden til dampen like før den blir komprimert, dvs. ved inngangen til kompressoren. Punkt 2 er tilstanden i væsken umiddelbart etter komprimeringen. Punktene 3 og 4 er tilstandene like før og etter strupingen. Ettersom  $H$  representerer

<sup>3</sup>Prosessene 3-4 kjenner vi igjen fra Joule-Thomson-eksperimentet, der en gass presses gjennom en smal ventil eller en porøs plugg. Gassens entalpi er konstant i en slik prosess - prosessen er isentalpisk.



Figur 2.4: Trykk-entalpidiagram ( $pH$ -diagram) for varmepumpe.



Figur 2.5: log  $p$ - $H$ -diagram for varmepumpe med typiske målepunkter (\*) inntegnet.



energi, kan vi lese av energibidragene i prosessen langs  $H$ -aksen: Fordampingsvarmen leses av mellom 4 og 1, og kondensasjonsvarmen leses av mellom 2 og 3, men korrigert for den korte biten mellom 2 og dogglinja, energien her gir oppvarming av gassen. Tilført energi  $W_C$  i kompressoren finnes ved å gå fra 1 til 2 langs  $H$ -aksen.

Figur 2.4 viser hvordan  $pH$ -diagrammet for en slik “trapesformet” prosess gir virkningsgraden for kjøleskap (R) og varmepumpe (HP) uttrykt ved direkte avlesbare entalpidifferanser for kjølemediet (under forutsetning av at varme kun utveksles i de to isobare delprosessene):

$$\epsilon_R = \left| \frac{Q_f}{Q_k - Q_f} \right| = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_1}, \quad (2.8)$$

$$\epsilon_{HP} = \left| \frac{Q_k}{Q_k - Q_f} \right| = \frac{H_2 - H_3}{H_2 - H_1}. \quad (2.9)$$

(k=kondensasjon; f=fordamping). Her er  $H_1$  entalpien i punkt 1 i syklusen osv. Første likhetstegn følger av definisjonen [nytte/kostnad], samt 1. hovedsetning med  $\Delta U = 0$  for sykliske prosesser (derav  $|W| = Q_k - Q_f$ ). Andre likhetstegn følger av at  $Q = \Delta H$  for isobare prosesser ( $p$ =konstant), se ligning (2.7), samt at  $H_4 = H_3$  (Joule-Thomson-effekten).

Vi skal nå gjøre oss kjent med den type entalpidiagram som brukes i praksis og hvordan målinger plottes inn i slike diagram. Diagrammet som er vist i Figur 2.5 er en litt forenklet versjon av det kommersielle entalpidiagrammet for kjølemediet R-134a som anvendes i vår varmepumpe. Det kommersielle diagrammet finner dere i Figur 2.9 på side 30.

Først noen kommentarer til selve diagrammet:

Som det fremgår av navnet er trykket  $p$  fremstilt i en logaritmisk skala – på utsnittet ser vi at skalaverdiene går fra ca. 80 bar – et svært høyt trykk, rundt 30 ganger trykket i en bilslange – til 0.08 bar som omtrent er lufttrykket ved 15000 m.o.h. En isobar vil være representert med ei horisontal linje.

Entalpiinnholdet i kjølemediet øker når vi beveger oss mot høyre i diagrammet og avtar når vi beveger oss mot venstre. Entalpien er gitt per masseenheter av kjølemediet, derfor enheten kJ/kg. Avgitt eller opptatt entalpi mengde mellom to tilstander er gitt som differansen mellom entalpiverdiene; f.eks. har kjølemediet opptatt ca.  $(418 - 230)$  kJ/kg = 188 kJ/kg ved å gå fra tilstand 4 til 1 på diagrammet i Figur 2.5.

Innenfor det mørkere arealet eksisterer kjølemediet som en blanding av væske og damp, der relativ dampmengde går fra 0 som er mettet væske til 1.0 som er mettet damp. De skrå linjene representerer kurver for konstant relativ dampmengde, der andelen er angitt med tall nederst.

Isotermene representerer kurvene for konstant temperatur. En isotherm (eksempelvis den stiplede  $-20^\circ$ -isothermen i figuren) følger den angitte kurven i gassen til høyre, og inne i området med væske-damp likevekt går isothermen langs en isobar fordi enhver tilførsel av varme ikke gir temperaturøkning men fordamping av væske. Når det er 100% væske,

**Tabell 2.1:** Verdier for temperaturer og trykk i kjølemediet, basert på målte verdier når varmepumpa er i arbeid. Merk at avleste verdier på trykkmålerne er relativt ytre lufttrykk  $p_0$ , som vi antar er 1.0 atmosfære. For symbolene refereres til Figur 2.5.

Parameter	Symbol	Verdi
Trykk fordamperside (“cold”)	$p_c$	2.0 bar + $p_0 = 3.0$ bar
Trykk kondensatorside (“hot”)	$p_h$	9.5 bar + $p_0 = 10.5$ bar
Temp. ved inngang kompressor	$T_1$	+20 °C
Temp. ved utgang kompressor	$T_2$	+58 °C
Temp. ved inngang ekspansjonsdyse	$T_3$	+24 °C
Temp. ved utgang ekspansjonsdyse	$T_4$	+1.5 °C
Temp. vannbeholder fordamperside	$T_c$	+2.6 °C
Temp. vannbeholder kondensatorside	$T_h$	+30.5 °C

vil isothermen være tilnærmet parallell med isentalpene når vi regner væsken som inkompressibel. Dette skyldes at enhver varmetilførsel ( $\Delta H$ ) i en inkompressibel væske må gi temperaturøkning, da ingenting kan tas opp som volumendring<sup>4</sup>.

Den siste kurveskaren i  $\log p$ - $H$ -diagrammet er isentropene som representerer konstant entropi. En reversibel adiabatisk prosess er isentropisk. Isentropene representerer derfor reversible prosesser uten varmeoverføring,  $Q = 0$ . Prosessen 1–2 er eksempel på dette; kompressorens komprimering er tilnærmet isentropisk med energitilførsel lik arbeidet  $W_C$ .

På kurven er det plottet inn målepunkter merket \* fra et virkelig forsøk med ei varmepumpe av vår type. Numeriske verdier for disse målepunktene er vist i tabell 2.1.<sup>5</sup>

Referert til Figurene 2.2a og 2.5 er nå:

**Punkt 1** er tilstanden til kjølemediet ved inngangen til kompressoren, dvs. der hvor 20 °C-isothermen krysser 3.0 bar-isobaren.

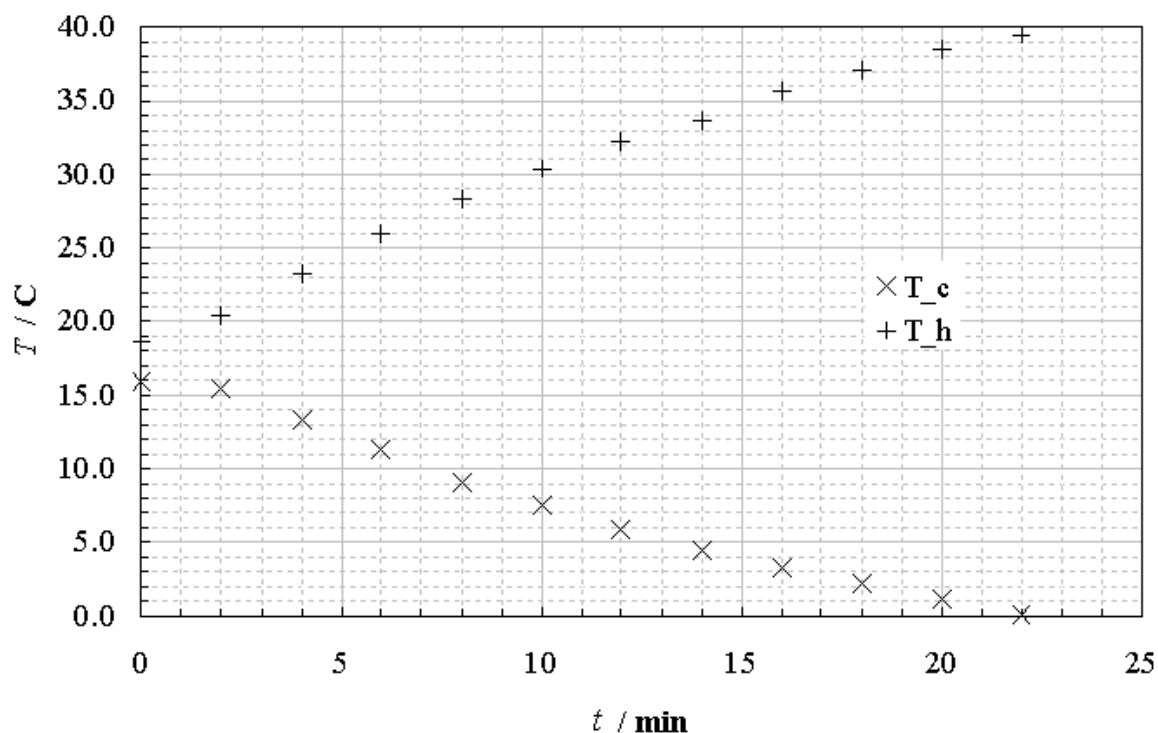
**Punkt 2** er utgangen av kompressoren og er gitt ved kryssing mellom 58 °C-isothermen og 10.5 bar-isobaren. Dette punktet kan også finnes ved å følge isentropen gjennom punkt 1 til kryssing av 10.5 bar-isobaren.

**Punkt 3** er inngangen til ekspansjonsdysen og er gitt ved kryssing mellom 24 °C-isothermen og 10.5 bar-isobaren.

**Punkt 4** finnes ved å følge isoentalpelinja gjennom 3 nedover inntil den krysser 3.0 bar-isobaren. I dette punktet skal også isothermen for den målte temperaturen +1.5 °C finnes, og vi ser at det stemmer rimelig bra.

<sup>4</sup>Væsken har også relativt høy massetetthet. Derfor er leddet  $V\Delta p$ , som kan bidra til entalpiendringer, relativt lite

<sup>5</sup>For å skille mellom tid og temperatursymboler bruker vi her og i det følgende  $T$  for å indikere temperatur målt i °C – normalt skal  $T$  brukes om absolutt temperatur målt i K (kelvin).



**Figur 2.6:** Temperaturutvikling i henholdsvis varm ( $T_h$ ) og kald ( $T_c$ ) vannbøtte for ei varmepumpe, som funksjon av tida.

Deretter kan vi følge isobaren for 3 bar tilbake til punkt 1 og vi kan nå tegne opp syklusen ved å trekke rette linjer 2–3, 3–4 og 4–1 samt ei linje som går tilnærmet parallelt med isentropen fra 1 til 2.

## 2.2 Forhåndsoppgaver

### 2.2.1 Virkningsgrad

Ei lita varmepumpe av samme type som du skal bruke i eksperimentene i avsnitt 2.3 brukes til å pumpe varme mellom to beholdere, hver med 4.00 L vann. Temperaturutviklingen i beholderne over en periode på 22 minutter er vist i Figur 2.6. I løpet av denne perioden trakk kompressoren en gjennomsnittseffekt på 100 W.

1. Skriv et pythonprogram der tallverdier for  $\Delta t$  (120 s), vannets varmekapasitet  $c = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ , vannets masse  $m$  og den elektriske effekten inn til kompressoren  $P$  legges inn, samt tabeller (numpy arrays) for  $T_h$  og  $T_c$ , både i Celsius og Kelvin. Lag figur av tidsutviklingen av  $T_h$  og  $T_c$  slik det er gjort i Figur 2.6. Dette programmet vil du ha god nytte av i analysen av dataene fra eget eksperiment.

Finn ut hvordan virkningsgraden til varmepumpa endrer seg i løpet av dette eksperimentet. Eksperimentell virkningsgrad følger fra ligning (2.4):

$$\epsilon_E = \frac{Q_2}{W_C} = \frac{c m \Delta T_h}{P \cdot \Delta t}. \quad (2.10)$$

Regn ut verdi for minst 3 – 4 punkter. Neglisjer varmetap til omgivelsene. Gjør gjerne denne utregningen ved bruk av pythonprogrammet du har skrevet, og lag figur av resultatet. Oppgitt: Vannets massetetthet er  $1.00 \text{ kg/L}$  rundt disse temperaturene.

2. Sammenlign med tilsvarende virkningsgrad for ei ideell Carnotvarmepumpe. Gjør gjerne denne utregningen ved bruk av pythonprogrammet du har skrevet, og lag figur av resultatet.

## 2.2.2 Kretsløpsanalyse

3. Tegn opp en damptrykkurve for kjølemediet R134a basert på  $\log p$ - $H$ -diagrammet i Figur 2.9 side 30. En damptrykkurve viser hva damptrykket er (i kPa) som funksjon av temperaturen, når det er likevekt mellom damp og væske (mettet damp). Bruk fortrinnsvis enkeltlogaritmisk skala (dvs  $\log p$  vs  $T$ ).

På varmepumpa er det blitt gjort målinger på kjølemediet som vist i tabell 2.1 (side 20). Temperaturene ble målt på overflaten til kobberørene som utgjør kretsløpet.<sup>6</sup>

Benytt  $\log p$ - $H$ -diagrammet i Figur 2.5 til å løse oppgave 4 til og med 7.

4. Hvor i syklusen er det størst utveksling av energi?

5. Hvor mye energi pr. masseenhet blir tilført kjølemediet når det passerer gjennom kompressoren?

6. Beregn virkningsgraden for varmepumpa når du antar at all energi som kompressoren forbruker blir tilført kjølemediet. Sammenlign resultatet med virkningsgraden beregnet i avsnitt 2.2.1 (målt verdi og Carnot-virkningsgrad). Gi en forklaring på eventuelle forskjeller i de beregnede virkningsgradene.

<sup>6</sup>Vi må anta at temperaturen i kjølemediet innenfor målepunktet er den samme som målt temperatur. Der hvor kjølemediet er flytende er denne antagelsen sannsynligvis brukbar, men der hvor kjølemediet er i gassform forventes en ikke-neglisjerbar temperaturdifferanse mellom kjølemediet og overflaten av kobberøret. Dette skyldes at utsiden av røret er i kontakt med romluften. Måleresultatene som er angitt i tabellen forventes derfor å ligge for nær romtemperaturen der hvor kjølemediet er i gassform.

7. Anta at temperaturen i den varme beholderen (som inneholder 4.00 L vann) øker med 1.00 K pr. minutt. Estimer massetransporten i kretsløpet i gram/minutt.

## 2.3 Eksperimentelt

### 2.3.1 Apparat

Følgende instrumenter inngår i oppstillingen:

- Danfoss TL3G kompressor på 100 W, kjølevæske R-134a
- ETECH PM30 Effektmåler med presisjon på  $\pm 1$  W
- Rørepinner og bølter med sirkuleringsslange

I den følgende forklaring vises til bildet i Figur 2.7 (side 24).

Vi leser av følgende temperaturer på digitaltermometrene som er montert i panelet øverst: Før ( $T_1$ ) og etter ( $T_2$ ) kompressoren, før ( $T_3$ ) og etter ( $T_4$ ) ekspansjonsdysen og i vannbeholderne ( $T_c$ ,  $T_h$ ).

To manometre ( $p_c$  og  $p_h$ ) for trykkmåling er montert inn i systemet. Trykket i bar leses av på ytterste skala. Trykket er gitt i forhold til atmosfæretrykket som settes til 1.0 bar, og atmosfæretrykket må legges til når vi skal plote trykket i entalpidiagrammet. Innenfor trykkskalaen på manometrene har vi temperaturskalaer som viser doggpunktet/koepunktet for angjeldende trykk for forskjellige kjølemedier – vi må bruke skala som er merket R-134a, som er vårt kjølemedium<sup>7</sup>.

Vannreservoarene (bøttene) står på svingbare hyller - de to spiralene inne i bøttene er vist ved hjelp av digital bildemanipulering. De to uttakene på sidene av enkelte bølter kan brukes i tilfelle vi ønsker å kjøre vann kontinuerlig. Bruk blå bølge ved fordamperspiral (FS), da vannet her blir kaldt; og rød bølge ved kondensatorspiral (KS), da vannet her blir varmt.

Filteret tar bort og kondenserer eventuelle gassrester i kjølemediet som nå er i væskeform. Under passasjen fra fordamper (FS) til kompressor varmes kjølemediet opp til omtrent romtemperatur før den ved fullført kretsløp går inn i kompressoren. Varmepumpa er koblet til strømmettet via et wattmeter som viser den elektriske effekten som sendes inn. I tillegg kan vi lese av tid, energiforbruk, strøm, spenning og kostnad.

Prosessen i varmpumpa reguleres av to kontrollsystemer:

---

<sup>7</sup>Disse skalaene brukes til innledende observasjoner.



**Figur 2.7:** Varmepumpa. FS = fordamperspiral, KS = kondensatorspiral. De øvrige symboler er forklart i teksten.

1. Åpningen av ekspansjonsventilen blir styrt av forskjellen mellom temperaturen i kjølemediet ved inngang og utgang fra fordampere. Kontrolleren er den tynne kveilen som dere ser på toppen av ekspansjonsventilen. Denne svært viktige kontrollfunksjonen sikrer at trykkfallet fra  $p_h$  til  $p_c$  blir riktig.
2. Trykket på kondensatorsiden blir overvåket av regulatoren slik at kompressoren slås av hvis trykket overstiger 16 bar. Hvis dette skjer, vil dere ikke kunne starte kompressoren på nytt før trykket har falt til 9 bar. *Fra damptrykkkurven i Figur 2.5 ser vi at damptrykket vil være ca. 16 bar ved ca.  $+60^\circ\text{C}$  på kondensatorsiden. Vi kan lett oppnå denne temperaturen hvis vi kjører varmepumpa for lenge eller uten vann i beholderen på kondensatorsiden. Dette bør vi unngå under eksperimentet.*

La oss kort oppsummere, med henvisning til den aktuelle instrumenteringen: Kompressoren pumper kjølemediet rundt i kretsløpet. Ved inntaket til kompressoren er kjølemediet i gassform med en temperatur som er omtrent lik temperaturen i rommet. Kjølemediet blir presset sammen i kompressoren slik at temperaturen stiger. Fremdeles i gassform, presses kjølemediet til kondensatorspiralen (KS) hvor den kondenserer og gir fra seg varme til vannreservoaret.

### 2.3.2 Innledende observasjoner

Svar på følgende spørsmål før du slår på varmepumpa første gangen:

1. *Varmepumpen har nå stått i ro over lang tid. Tror du kjølemediet er i væske eller dampform på kondensatorsiden? Enn på fordampersiden?*
2. *Hvilket trykk forventer du at det skal være på kondensatorsiden og på fordampersiden, før kompressoren starter? Baser svaret på log  $p$ - $H$ -diagrammet i Figur 2.9 og på svaret ditt fra oppgave 1.*
3. *Les av trykket på manometrene og sjekk svarene dine.*
4. *Manometrene har både en trykkskala og en temperaturskala som er merket med R-134a. Sammenlign de to skalaene med damptrykkkurven du har funnet i oppgave 3 i avsnitt 2.2.2.*

### 2.3.3 Gjennomføring

1. Fyll vann med temperatur rundt  $15^\circ\text{C}$  i begge bøtter. Forsikre deg om at spiralene er helt dekket. Mål volumet av vannet du fyller opp.
2. Start pumpa. Fra dette tidspunktet må det røres kontinuerlig i begge bøttene.
3. Med to minutter mellomrom; mål temperaturen i bøttene ( $T_h$  og  $T_c$ ), temperaturen i rørene ( $T_1 - T_4$ ), manometerverdiene  $p_c$  og  $p_h$  og den elektriske effekten  $P$  i W.

Tidutviklingen til disse størrelsene trengs i analysen av virkningsgrader.

4. Slå av pumpa hvis det dannes is på spiralen i den kalde bøtta eller etter 26 minutter.  
*Vær oppmerksom på at det kan være vanskelig å oppdage isdannelsen.  
Hvis dere rører godt, vil dere kunne få temperaturer under  $0^{\circ}\text{C}$  i den kalde bøtta.  
Vannet er da underkjølt, og straks røringen stopper vil vannet fryse.*
5. Plasser bøttene under spiralene, slik at vannet renner av spiralene.
6. Analyser målingen som beskrevet i avsnitt 2.3.4 og svar på diskusjonsspørsmål i avsnitt 2.3.5. Lever journalen til laboratorielæreren for godkjenning.
7. Tøm vannet fra bøttene, sett dem på plass og tørk opp eventuelt vannsøl.

### 2.3.4 Analyse

- Plott temperaturutviklingen i de to bøttene. Bruk samme akser som på grafen i Figur 2.6. Inkluder måleusikkerheten dersom usikkerhetsstolpene er synlige.
- Plott utviklingen i den eksperimentelle virkningsgraden  $\epsilon_E$  og dens usikkerhet. Eksperimentell virkningsgrad følger fra ligning (2.4):

$$\epsilon_E = \frac{Q_2}{W_C} = \frac{c m_h \Delta T_h}{P \cdot \Delta t} \quad , \quad (2.11)$$

hvor  $c$  er spesifikk varmekapasitet for vann ( $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ ),  $m_h$  er massen av vannet i den varme bøtta og  $P$  er den elektriske effekten inn til kompressoren.  $\Delta T_h$  er temperaturøkningen i den varme bøtta i løpet av tiden  $\Delta t$ .

- Beregn og plott virkningsgraden dersom varmepumpen hadde vært en Carnotmaskin,  $\epsilon_{\text{HP, maks}}$ , og dens usikkerhet.
- Tegn syklusen inn i det vedlagte  $\log p$ - $H$ -diagrammet med verdiene etter ti minutter. Bestem virkningsgrad fra forholdet mellom kondensasjonsvarme og tilført energi slik det fremkommer på ditt  $\log p$ - $H$ -diagram. Vurder usikkerheten av virkningsgraden.  
*Tips:* Se Figur 2.5, forklaring på side 20 og ligning (2.4).
- Sammenlign de tre verdiene av  $\epsilon$  etter ti minutter.  
Sannsynligvis vil virkningsgraden dere beregner fra  $\log p$ - $H$ -diagrammet være vesentlig høyere enn den målte eksperimentelle virkningsgraden. Kan dere gi en forklaring på dette?
- *Ekstraoppgave:* Hva blir den eksperimentelle virkningsgraden dersom vi ser på oppsettet som en kjølemaskin?



### 2.3.5 Diskusjon

- Idet du starter varmepumpen dekker kretsprosessen kun et lite område i  $\log p$ - $H$ -diagrammet. Etter kort tid vil kretsprosessen stabilisere seg nær kurven i Figur 2.5. Diskuter dere fram til, og skisser hvordan dere tror kretsprosessen utvikler seg rett etter at kompressoren starter fram til systemet stabiliseres.
- Hva er fordampings- og kondensasjonsvarmen for kjølemediet ved  $0^\circ\text{C}$  og ved  $40^\circ\text{C}$ ?
- Vurder muligheten for å vinne energi fra luft med ei varmepumpe.

## 2.4 Tillegg:

### Krav til og klassifikasjon av kjølevæsker

#### Krav til kjølemedier:

- Ved romtemperatur skal damptrykket være 2–6 atm, dvs. kokepunktet skal ligge rundt romtemperatur for noen få atmosfærers trykk. Vann,  $\text{H}_2\text{O}$ , er derfor ubrukelig da damptrykket er 24 mmHg (3.2 kPa eller 0.032 atm) ved romtemperatur.
- Høy fordampingsvarme.
- Ikke miljøskadelig.

Det finnes mange medier som oppfyller de to første av disse kravene.

R-717 (Ammoniakk –  $\text{NH}_3$ ) er egentlig svært optimalt ut fra de to første kravene og ble brukt i de første kjølesystemene. Dessverre er ammoniakk giftig og etsende slik at etter noen ulykker ble den forbudt i private anlegg. I industriell kjølesammenheng er fremdeles ammoniakk i bruk.

Freongassene R-12 og R-22 tok deretter over som kjølemedium i mange år, og alle var fornøyde inntil man oppdaget at disse gassene ødelegger atmosfærens ozon. I de senere år er det blitt utviklet flere nye kjølemedier som er vesentlig mindre aggressive. Blant disse er R-134a ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ ) som vi skal bruke i denne oppgaven.

Tabell 2.2 viser egenskapene til noen kjølemedier. R-407c og R-410a er mest brukt i luft-luft varmepumper i Norge i dag. R-134a er litt dårligere som kjølemedium på grunn av høyere kokepunkt og lavere damptrykk og brukes til formål med midlere kjølekrav som kjøleskap, luftkondisjoneringer i biler etc. R-22 og R-12 er som nevnt ikke lenger tillatt brukt.

#### Klassifikasjon av kjølemedier:

Kjølevæsker består av karbonforbindelser med ulike antall C-atomer og med hydrogen (H), fluor (F), klor (Cl) eller bor (B) på sidegreinene (noen unntak, bl.a.  $\text{NH}_3$  og  $\text{CO}_2$ ). For ikke-sykliske C-kjeder er totalt antall sidegreiner lik ( $\text{antall C} \times 2 + 2$ ). Dette må da være lik summen av antall H, F, Cl og B-atomer.

Væskene klassifiseres etter en kodebetegnelse gitt av en internasjonal standard ISO/TC86-WG-1. Koden har formen:

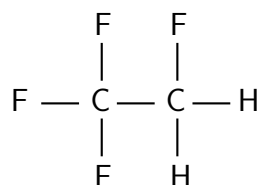
$$\text{RC-}xyz \text{ Bu,}$$

der

- R betegner at forbindelsen er kjølevæske,

**Tabell 2.2:** De viktigste egenskapene til noen kjølemedier. Blanding betyr at flere kjølemedier er benyttet, f.eks. er R-410a sammensatt av like deler R-32 ( $\text{CH}_2\text{F}_2$ ) og R-125 ( $\text{C}_2\text{F}_5\text{H}$ ).

Navn	Kjemisk formel	Kokepkt ( $^{\circ}\text{C}$ ) v/ 1 atm	Væske: Varmekap. ( $\text{kJ}/(\text{kg K})$ )	Damp: Varmekap. ( $\text{kJ}/(\text{kg K})$ )	Damptrykk (kPa) v/ $25^{\circ}\text{C}$	Ford.varme ( $\text{kJ}/\text{kg}$ ) (v/ k.p.)
R-134a	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$	-26.5	1.42	0.854	662	215
R-407c	(blanding)	-43.6	1.54	0.83	1174	
R-410a	(blanding)	-51.5	1.84	0.83	1653	
R-22	$\text{CHClF}_2$	-40.8	1.24	0.657	1043	
R-12	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	-21.6	0.97	0.617	652	
Propan	$\text{C}_3\text{H}_8$	-42		1.68	950	431
Ammoniakk	$\text{NH}_3$	-33	2.1	2.06	1001	1368
Karbon-dioksyd	$\text{CO}_2$	-78 (sublim.)	0.83	0.84	6400	573
Vann	$\text{H}_2\text{O}$	+100	4.2	1.89	3.17	2257
Propan	$\text{C}_3\text{H}_8$	-42		1.68	950	431

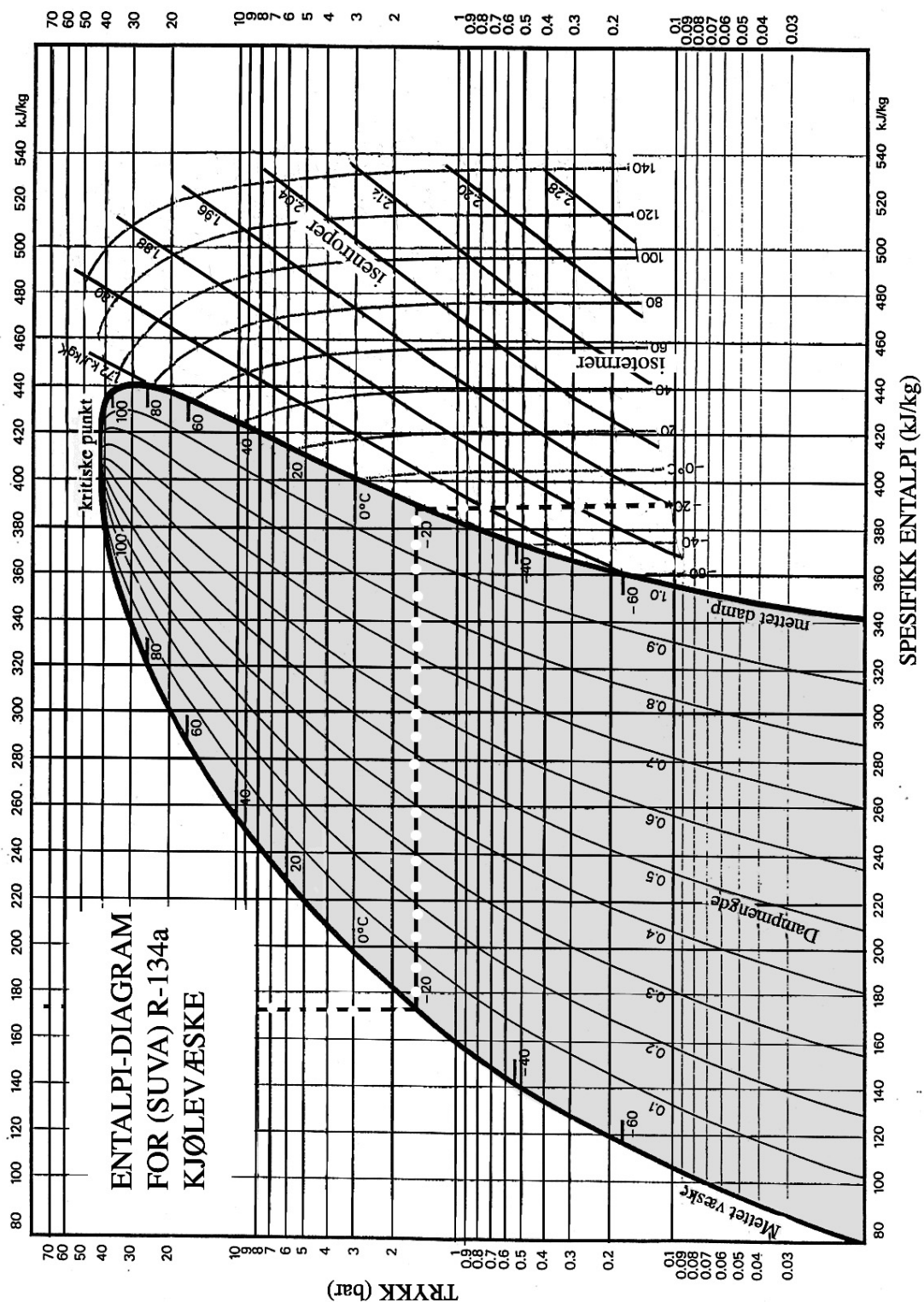


**Figur 2.8:** Molekylstruktur av R134a (1,1,1,2-tetrafluoroetan).

- C betegner at forbindelsen er syklisk (C droppes for ikke-sykliske forbindelser),
- $x$  betegner (antall C-atomer  $- 1$ ) i formelen (når  $x = 0$  droppes  $x$  fra koden),
- $y$  betegner (antall H-atomer  $+ 1$ ) i formelen,
- $z$  betegner antall F-atomer i formelen,
- B betegner at forbindelsen inneholder B-atomer der  $u$  betegner antall B-atomer (når  $u = 0$  droppes  $Bu$  fra koden),
- antall Cl-atomer i den kjemiske formelen kan finnes ved at summen av antall (H, F, Cl og B)-atomer er lik totalt mulige sidegreiner i C-kjeden.

**Eksempel:** R134a:

Ikke-syklisk,  $(1+1) = 2$  C-atomer,  $(3-1) = 2$  H-atomer og 4 F-atomer. Mulige sidekjeder er  $2 \times 2 + 2 = 6$  som er brukt opp av H og F slik at det er ingen Cl eller B-atomer. Kjemisk formel er  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ , og strukturen er vist i Figur 2.8:



**Figur 2.9:** Det kommersielle log  $p$ - $h$ -diagram for R-134a kjølevæske. Diagrammet er litt forenklet ved at vi har fjernet et kurvesett (isokorene) som er uaktuelt i denne oppgaven. I tillegg er halvparten av isentropene fjernet.

# Bibliografi

- [1] E. Lillestøl, A. Hunderi og J.R. Lien, 2001 *Generell fysikk for universiteter og høyskoler. Bind 2: varmelære og elektrisitetslære*, Universitetsforlaget.
- [2] M. Alonso and E.J. Finn, 1992 *Physics*, Addison Wesley.
- [3] P.C. Hemmer, 2002 *Termisk fysikk*, Tapir.
- [4] G.L. Squires, 1985, *Practical Physics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [5] N.C. Barford, 1985, *Experimental Measurements: Precision, Error and Truth*, (2nd edn), Wiley, Chichester.
- [6] PASCO scientific, 1988, Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Model TD-8553/8554A/8555.