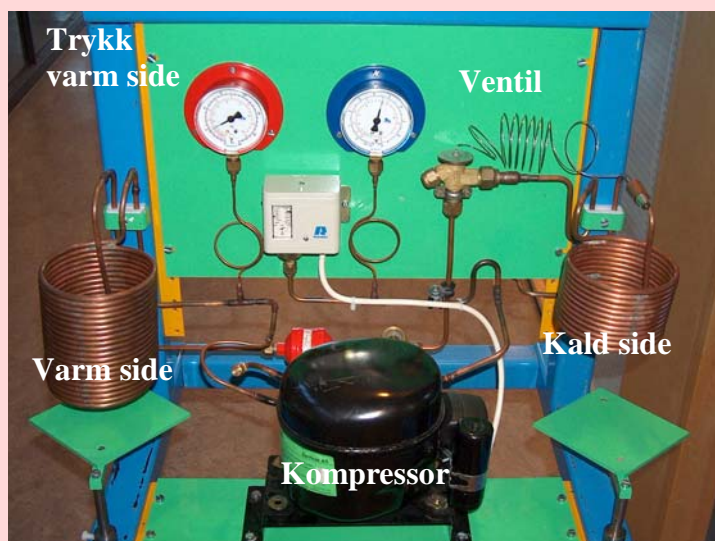


*Nils Kr. Rossing
Tore Fagerli*

Varmepumper og solfangere – et laboratoriehefte



NTNU



Trondheim

Program for
lærerutdanning

Skolelaboratoriet
for matematikk, naturfag
og teknologi

Nr. 12
Oktober 2013

Tidligere utgitt i SLserien:

- Nr. 1, aug. 2003: Rein: **Hold og stell av vandrende pinner***
- Nr. 2, okt. 2003: Rossing, Stefansson, Bungum: **Elektronikk for skolen***
- Nr. 3, nov. 2003: Rossing, Kind: **Kreativitet og skaperglede***
- Nr. 4, aug. 2004: Rossing, Fagerli, Dinesen: **Teknologi i skolen, "Bygg et hus"***
- Nr. 5, okt. 2004: Karoliussen: **Fornybare energikilder***
- Nr. 6, apr. 2005: Ragnar Næss: **Luft og strømminger***
- Nr. 7, des. 2005: Rossing: **Fra elektriske kretser til intelligente hus***
- Nr. 8, mars 2006: Karoliussen: **Energi for framtida***
- Nr. 9, juni 2006: Rossing, Kjeldstad: **Fysikkløypa ved NTNU***
- Nr. 10, nov. 2006: Bungum: **Mekaniske leker: Prinsipper og ideer***
- Nr. 11, des. 2006: Marion: **Feltarbeid i naturfag og biologi***

**VARMEPUMPER OG SOLFANGERE –
ET LABORATORIEHEFTE**

ISBN 978-82-7923-051-9
ISSN 1503-9242

Varmepumper og solfangere – et laboratoriehefte

Trondheim 2007

Layout og redigering: Nils Kr. Rossing

Tekst og bilder: Nils Kr. Rossing, Skolelaboratoriet/Vitensenteret
Tore Fagerli, Byåsen videregående skole

Redaktører for SLserien: Torlaug Løkensgard Hoel
Ove Haugaløkken
Sissel Mathiesen

Faglige spørsmål rettes til:

Skolelaboratoriet for matematikk, naturfag og teknologi, NTNU

v/Nils Kr. Rossing, 73 55 11 91

nils.rossing@plu.ntnu.no

Realfagbygget, Høgskoleringen 5
7491 Trondheim

Skolelaboratoriet

Telefon: 73 55 11 43

Telefaks: 73 55 11 40

<http://www.skolelab.ntnu.no/>

Utgave 1, Rev 4.4 – 06.10.13

Varmepumper og solfangere – et laboratoriehefte

Nils Kr. Rossing
Tore Fagerli





Forord fra redaktørane

For få år sidan var varmpumpe ukjent for dei fleste. Dei siste par åra er varmpumper blitt eit vanleg tema i debatten om energi både nasjonalt og globalt. Temaet for dette heftet går såleis inn i ein verdsospennande diskusjon om energi og miljø. Varmepumper i samband med oppvarming av hus blir meir og meir vanleg. Vi finn dei i samband med kjøleskap og fryseboksar, vi finn dei i brusautomatar, i kjølerom og kjølediskar i daglegvarebutikkar, og vi finn dei i klimaanlegg i bilar. Enkelte varmpumper er utvikla slik at dei er reversible og kan brukast til å avkjøle huset på varme dagar. Det blir sagt at på verdsbasis blir det brukt meir energi til kjøling enn til oppvarming.

I dette heftet gir forfattarane ei innføring i korleis varmpumper verkar. Lesaren møter spennande spørsmål; om det er mogeleg å pumpe varme frå ein kald til ein varm stad, interessante eksperiment, om å koke vatn ved 50 °C, og praktiske tips om korleis ein kan halvere steketida på oksesteika.

Varmepumper og solfangarar er spesielt aktuelt for naturfag på VG1, der dette temaet er nemnt i læreplanen. Heftet vil vere ei støtte til elevverkstaden "Varmepumper og kjøleskap" og til lærarkurs over same temaet. Heftet er først og fremst tenkt som rettleiing for lærarar, men delar av det kan brukast som elevark under laboratorieøvingar.

Trondheim, februar 2007

Torlaug Løkensgard Hoel

Ove Kr. Haugaløkken

Sissel W. Mathiesen



Forord

Målet med heftet er å være en støtte til elevverkstedet – *varmepumper og kjøleskap*, og lærerkurs over samme tema. Heftet er primært ment som en lærerveiledning, men deler kan brukes som elevark under laboratorieøvelsene. Heftet inneholder en prinsipiell beskrivelse av varmepumpas virkemåte og oppbygning, supplert med forslag til eksperimenter for å vise hvordan den fungerer. For å vise at damp inneholder vesentlig mer termisk energi enn varmt vann med samme temperatur, beskrives et forsøk for å måle spesifikkvarmekapasitet til vanndamp. Dessuten beskrives måling av varmefaktoren til ei varmepumpe.

Heftet inkluderer også laboratorieøvelser knyttet til solfangere. Det teoretiske underlaget knyttet til måling av spesifikk varmekapasitet, kommer godt med også i denne sammenhengen.

Som supplerende litteratur anbefales:

Einar Oterholm, *Varmepumper*, Einar Forlag 2003

Fritjof Salvesen (red.), *Nye fornybare energiklider*, revidert utgave 2001

Jørn Stene, *Varmepumper – Grunnleggende varmepumpeteknikk* SINTEF 1997 og *Varmepumper*, SINTEF <http://www.energy.sintef.no/prosjekt/Annex29/>

En takk til *Maria Sviland* og *Peter van Marion* ved Skolelaboratoriet, *Atle Kjærvik* ved Vitensenteret og *Einar Oterholm*, som har lest korrektur og gitt verdifulle innspill. Også en takk til *Jørn Stene* ved SINTEF Energiprosesser, som har bidratt med underlagsmateriale og korrekturlesning av avsnitt 2.3.

Utstyret til laboratorieøvelsene er levert av KPT Naturfag.

Nils Kr. Rossing
Tore Fargerli
Juni 2007



Innhold

1 Innledning	11
1.1 Kunnskapsløftet	11
2 Varmepumper	12
2.1 Varmepumpers virkemåte	12
2.1.1 Er det mulig å pumpe varme fra et kaldt til et varmt sted?	12
2.1.2 Fordampning og kondensering	14
2.1.3 Trykket over væsken endrer kokepunktet	18
2.1.4 Kompressorens og ventilens funksjon	20
2.1.5 Oppsummering	23
2.2 En gammel oppfinnelse	23
2.3 Arbeidsmedier og p-h diagrammer	24
2.3.1 Metningstrykk [5]	25
2.3.2 p-h diagrammet	26
2.4 Pedagogisk forklaringsmodeller	29
2.4.1 “Fotball/tennisball-modellen”	29
2.4.2 Sirkulasjonsmodellen	30
2.4.3 Varmefaktor	33
2.5 Laboratorieoppgaver, varmpumper	33
2.5.1 Måling av kondensasjonsvarmen til vann	33
2.5.2 Måling av temperaturøkning tilsatt 5 ml kokende vann	34
2.5.3 Måling av temperaturøkning tilsatt damp tilsvarende 5 ml vann .	36
2.5.4 Beregning av kondensasjonsvarmen til vanndamp	38
2.5.5 Teorigrunnlag	38
2.5.6 Måling av kondensasjonsvarmen til vanndamp, et måleeksempel .	40
2.6 Målinger på varmpumpe, demonstrasjonsmodell	43
2.6.1 Måling av varmfaktor	43
2.6.2 Måling av varmfaktor for varmpumpa, et måleeksempel	49
3 Solfanger-laboratorium	54
3.1 Innledende forsøk, oppvarming av flasker med ulike farger	55



3.1.1 Måleprosedyre	55
3.1.2 Oppvarming av flasker med ulike farge, måleeksempler	59
3.2 Solfanger for vannbåren varme	63
3.2.1 Måleoppsett og prosedyre	63
3.2.2 Solfanger med vannbåren varme, et måleeksempel	67
3.3 Solfanger med parabol	70
3.3.1 Måleoppsett og prosedyre	70
3.3.2 Solfanger med parabol, et måleeksempel	72
3.4 Solfanger i papp	74
3.4.1 Måleoppsett og prosedyre	74
3.4.2 Solfanger i papp, et måleeksempel	76
4 Referanser	77



1 Innledning

I de fleste hjem finner vi en eller flere varmepumper knyttet til kjøleskap, frysebokser og klimaanlegg. Videre finner vi varmepumper i brusautomater, bilens klimaanlegg og i dagligvarebutikkens kjølerom og kjøledisker. Etter hvert installeres det også stadig flere luft-til-luft- og vann-til-vann-varmepumper for oppvarming av bolig. Noen er også reversible, slik at de kan brukes til kjøling av boligen på varme dager. Det sies at det på verdensbasis brukes mer energi til kjøling enn til oppvarming.

I tillegg til å gi en kort innføring i varmepumpas prinsipielle virkemåte, er heftet ment å være et laboratoriehefte. Det beskriver måling av kondensasjonsvarmen for vann og måling av varmfaktoren (effektiviteten) til ei varmepumpe. Registrering av kondensasjonsvarmen for vann kan enten gjennomføres som en *kvantitativ måling* for å vise at mye energi lagres i damp, eller som en *kvantitativ måling* for å bestemme kondensasjonsvarme for vann.

Solfangere er foreløpig brukt i bare liten grad i Norge. I solrike strøk derimot, er dette en meget brukt teknologi for oppvarming av vann. I Midtøsten finner en slik nesten på hvert hustak. Siden denne metoden er tatt med i læreplanen, har vi inkludert et knippe laboratorieoppgaver for karakterisering av noen ulike solfangere.

I dette heftet har vi forsøkt å bruke begrepet *varme* om den energien som forflytter seg fra et kaldt til et varmt sted, eller vi har brukt termisk energi. Vi har dessuten valgt å bruke begrepet varmepumpe både når en utnytter varmdelen og når en utnytter kalddelen, til tross for at det i det siste tilfellet kanskje er riktigere å bruke ordet *kjøleskap* eller *fryser*.

1.1 Kunnskapsløftet

I første rekke berøres temaet varmepumper og nye fornybare energikilder i naturfag på ungdomstrinnet og på VG1.

Fenomener og stoffer (Energi for framtiden) – etter 10. trinn

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne (ett av flere mål)

- ...



- forklare hvordan vi kan produsere elektrisk energi fra fornybare og ikke-fornybare energikilder
- ...

Fenomener og stoffer (Energi for framtiden) – etter VG1

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne

- gjøre forsøk med solceller og **solfangere og forklare virkemåten**
- **gjøre rede for fysiske prinsipper for hvordan varmepumper virker, og i hvilke sammenhenger varmepumper brukes**
- forklare hva redoksreaksjoner er, gjøre forsøk med forbrenning, galvanisk element og elektrolyse og gjøre greie for resultatene
- beskrive virkemåten og bruksområdet til noen vanlige ladbare og ikke-ladbare batterier og til brenselceller
- gjøre rede for ulik bruk av biomasse som energikilde
- gjøre rede for hydrogen som energibærer

Vi ser at det er primært på VG1 at varmepumper kommer inn med full tyngde.

2 Varmepumper

2.1 Varmepumpers virkemåte

I dette kapitlet skal vi på en enkel måte forklare prinsippet for varmepumper.

2.1.1 Er det mulig å pumpe varme fra et kaldt til et varmt sted?

Varmepumper er i utstrakt bruk i kjøleskap i frysebokser og fryserom til lagring av mat. I de senere årene har varmepumper også vært brukt til frysetørring av matvarer. Disse finnes i dagligvareforretningen, for eksempel suppeposer og annen hurtigmat som bare skal tilsettes vann og gis et oppkok. Dessuten brukes varmepumpa til klimaanlegg, det vil si oppvarming og avkjøling av boliger og næringsbygg. Royal Garden Hotell i Trondheim er et godt eksempel på hvordan

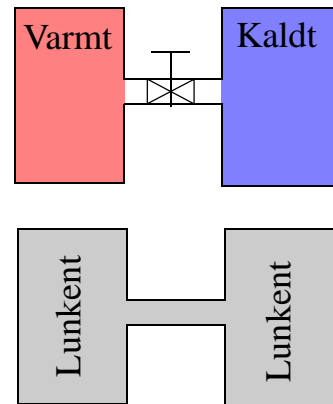


et hotell har brukt varmepumper til oppvarming. Hotellet har installert en vann-til-vann-varmepumpe som henter energi fra Nidelva for å gi hotellet varmt vann til romoppvarming, dusj og vask. Varmepumpa ved Royal Garden er på 700 kWatt. Ved Statoils forskningscenter på Rotvoll utenfor Trondheim, brukes en varmepumpe på 900 kWatt. Denne henter energi fra Trondheimsfjorden. Også den nye industriparken på Fornebu bruker varmepumper for oppvarming, og på Oslo lufthavn Gardermoen har de en varmepumpe på 7 MWatt. Oslo energiverk har landets største vann-til-vann varmepumpe på hele 18 MWatt. Den henter varme fra kloakk-renseanlegget på Skøyen Vest.

Dette er bare noen ganske få eksempler på større anlegg, som det blir flere og flere av i Norge.

Men hvordan virker så en varmepumpe?

Dersom et varmt og et kaldt sted settes i forbindelse med hverandre, vil varme utveksles. Varme vil *flyte fra det varme til det kalde stedet*, slik at begge steder etter hvert vil få samme temperatur. Varme er atomer og molekyler i bevegelse. Stor bevegelse betyr mye varme, liten bevegelse mindre varme. Vi har to beholdere med henholdsvis varmt og kaldt vann. Når vi åpner ventilen mellom karene, vil det sive varmt vann over til den kalde siden og omvendt. De varme molekylene støter bort de kalde og *avgir* bevegelsesenergi (varme), og blir avkjølt. De kalde molekylene *får* bevegelsesenergi og blir oppvarmet.



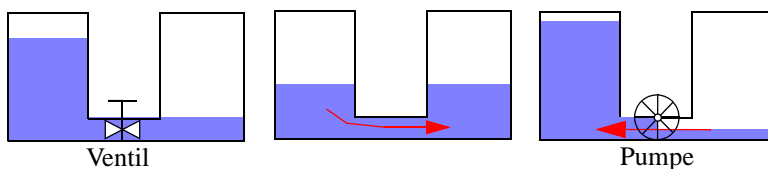
Etter en tid vil gjennomsnittlig varme for vannmolekylene i de to beholderne være omtrent lik, det vil si at temperaturen i de to beholderne er den samme. Temperatur er derfor et mål for gjennomsnittlig bevegelsesenergi hos molekylene.

Spørsmålet er: Er det mulig å gå den motsatte veien, for eksempel å *pumpe varme fra den kalde beholderen over i den som er varmere?*

Noen vil mene at det er umulig å varme opp et rom fra en kilde som er kaldere enn rommet som skal varmes opp. Det er imidlertid fullt mulig. Dette kan skje ved at den kalde kilden avgir varme og blir litt kaldere, mens rommet får tilført varmen og blir varmere. Denne prosessen går ikke av seg selv, men krever energi. Vi kan tenke på denne prosessen som å pumpe vann fra et kar med lite vann til et



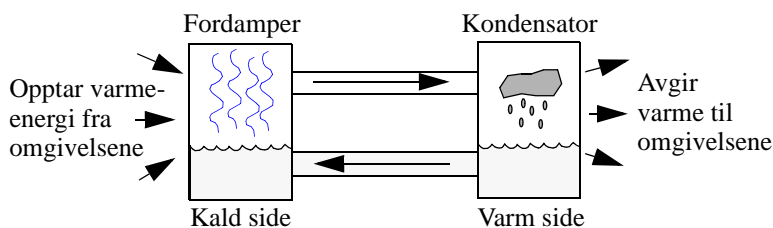
kar med mye vann. Dersom vi åpner ventilen, vil vannet renne av seg selv fra karet med mye vann til karet med lite vann, helt til begge karene har like høy vannstand. Vi trenger ikke å tilføre energi, gravitasjonen gjør jobben for oss. Skal vi få det motsatte til å skje, må vi sette inn ei pumpe, det vil si **vi må tilføre energi** som vist på figuren over. Da blir det nesten fulle karet enda litt fullere, og det nesten tomme karet blir kanskje helt tomt.



Slik er det også med varme; for å pumpe varme trenger vi ei varmpumpe. Et kjøleskap eller en fryseboks er en varmpumpe hvor vi er mest interessert i den kalde delen. Den kan for eksempel pumpe varme fra det allerede kalde rommet inne i kjøleskapet, til rommet utenfor. For å forstå at det er mulig å pumpe varme fra et kaldt til et varmt sted, er det viktig å ha klart for seg at selv om det er kaldt (for eksempel under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), så er det fortsatt termisk energi til stede. Det er først når vi når det absolutte nullpunkt ved $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ at all termisk energi er borte. Dermed kan Celsius-skalaen forvirre oss med 0 ° ved vannets frysepunkt.

2.1.2 Fordampning og kondensering

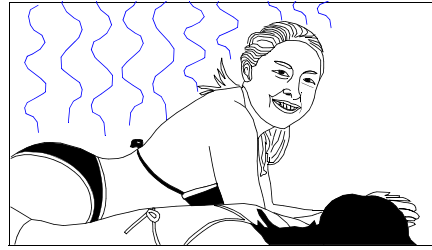
I figuren til høyre har vi på en meget enkel måte illustrert prinsippet for ei varmpumpe. Varmepumper utnytter *fordampning*



og *kondensering*. *Fordampning* krever varme, som tas fra omgivelsene som blir avkjølt. Når noe *kondenserer* (går fra gass til væske), avgir det varme slik at omgivelsene blir oppvarmet. Vi skal se litt mer i detalj hvordan dette er mulig, ved å vise noen eksperimenter og eksempler fra hverdagen.



De fleste har sikkert merket at man kan bli temmelig kald dersom en lar være å tørke seg etter et bad, og i stedet lar den våte kroppen tørke av seg selv. For at kroppen skal bli tørr, må vannet gå over til vanndamp. Til det kreves mye varme. Vannet som fordamper, tar varme fra kroppen som dermed avkjøles.



Ekspiriment: 1 Fordampning fra huden

Ha litt eter, parfyme eller etterbarberingsvann på huden. Hvordan kjennes det?

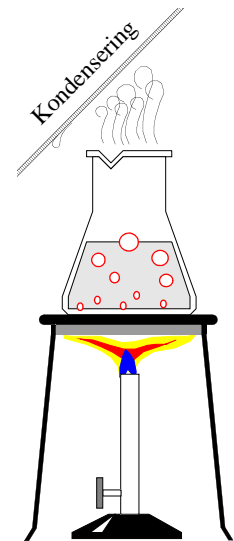
Du merker at huden blir avkjølt. Eter, parfyme og etterbarberingsvann inneholder stoffer som lett fordampes. Fordampning krever varme, som vi merker ved at huden avkjøles.

Ekspiriment: 2 Kondensasjon

På samme måte som det kreves mye tilført varme for å gjøre væske om til damp, så vil damp som kondenserer, avgi mye varme. Det kan vi merke når vi holder ei kald glassplate over varm damp. Dampen kondenserer mot glassplata, som etter hvert blir svært varm.

Kok opp litt vann i en erlenmeyerkolbe. Hold ei messing- eller stålplate over dampen som kommer ut av kolben.

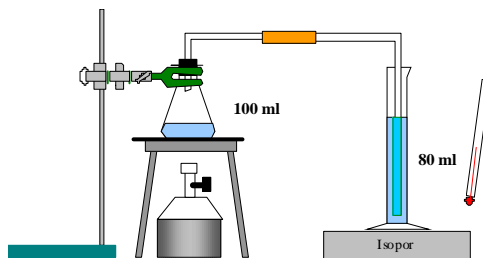
La dampen kondensere mot den kalde plata, og kjenn at plata blir varm på baksiden. Ved kondensering avgir dampen den varmen som den opptar ved fordampning.





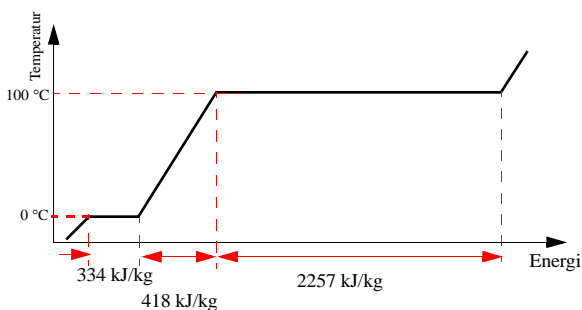
Eksperiment: 3 Avgitt varme ved kondensasjon

Fyll en målesylinder med 80 ml vann fra springen, mål temperaturen. Tilsett 5 ml kokende vann (ca. 100 °C) og rør rundt. Hva viser temperaturen?



Gjenta forsøket, ved å kjøre vanndamp med ca. 100 °C ned i målesylinderen. Dampen vil kondensere. Hva vil temperaturen nå vise når vannstanden har steget 5 ml?

Forsøket viser at det er mye mer termisk energi i vanndamp med 100 °C enn i vann med samme temperatur. Figuren til høyre viser at det kreves 418 kJ for å varme opp 1 kg vann fra 0 °C til 100 °C, mens det kreves 2257 kJ for å omdanne 1 kg vann ved 100 °C til damp ved samme temperatur. Dette forsøket er beskrevet i detalj i kapittel 2.5.1.



Eksperiment: 4 Underkjølt natrium acetat

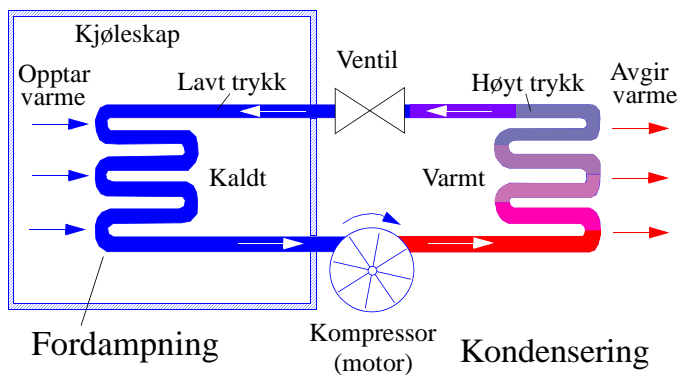
Et annet eksperiment som demonstrerer dette på en enda mer dramatisk måte er underkjølt *natriumacetat*. Det kan lett demonstreres med et produkt som går under navnet “CRISTALHEAT” eller “Heat pad”. En forseglet plastpose inneholder flytende natriumacetat og en metallskive.



Press metallskiven mellom fingrene slik at den lager et knepp. Det vil medføre at væsken krystalliseres, samtidig som den blir sterkt oppvarmet.



Ved romtemperatur er natriumacetat normalt krystallinsk, det vil si i fast form. Ved oppvarming i kokende vann vil krystallene smelte (smeltepunkt $58\text{ }^{\circ}\text{C}$) og bli en gjennomsiktig flytende væske. Ved nedkjøling til romtemperatur vil stoffet forbli flytende, det vil si det forblir i en underkjølt tilstand inntil man skaper krystallisasjonskjerner ved å lage et knepp med metallskiven som er i posen. Krystalliseringen er en eksoterm prosess som frigjør varmen som ble tilført stoffet da det smeltet i det kokende vannet. Dette eksperimentet demonstrerer at smelting krever tilførsel av varme, en varme som kan frigjøres når stoffet igjen størkner (fryser).



I ei varmepumpe brukes ikke vann, men et medium som opptar energi ved fordampning og avgir energi ved kondensering. La oss se nærmere på hvordan ei varmepumpe er bygget opp. Vi kan se på et kjøleskap som er ei varmepumpe hvor vi primært er interessert i

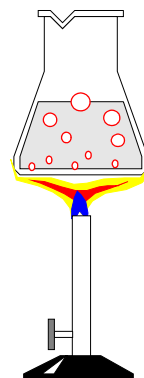
den kalde siden av pumpa, det vil si fordampningssiden. Når varme pumpes ut av kjøleskapet, blir det kaldere på innsiden og ørlite grann varmere på utsiden

I veggen inne i kjøleskapet ligger det et rør fylt med en væske (*arbeidsmedium*) som fordampner inne i kjøleskapet og dermed opptar varme fra innsiden av kjøleskapet som avkjøles. Deretter pumpes væsken gjennom røret som passerer ut gjennom veggen i kjøleskapet og går i slynger på baksiden av skapet. Her kondenseres dampen i røret og avgir varmen til omgivelsene. Dersom vi kjenner på



rørene som ligger på baksiden av kjøleskapet, kjenner vi at de er varme. Ei pumpe (kompressor) sørger for å drive væsken rundt i rørsystemet. I tillegg har den, som vi skal se i neste avsnitt, en annen viktig funksjon.

Spørsmålet er: Hvordan får vi arbeidsmediet til å fordampe i den delen av kjøleskapet som er kaldt, og kondensere der det er varmt? I utgangspunktet synes dette *mot* naturens orden. La oss se litt på hva koking er før vi besvarer dette spørsmålet.



2.1.3 Trykket over væsken endrer kokepunktet

Dersom vi varmer opp vann i en kjele, vil temperaturen stige jevnt og trutt. Når den når 100 °C, vil store bobler stige opp gjennom væsken. Vi sier at det *koker*. Samtidig vil det stige damp opp fra kjelen. Etter at det har begynt å koke, stiger ikke temperaturen mer, men er konstant lik 100 °C helt til alt vannet er fordampet. Det betyr at all varme som tilføres, brukes til å omdanne vannet til damp.

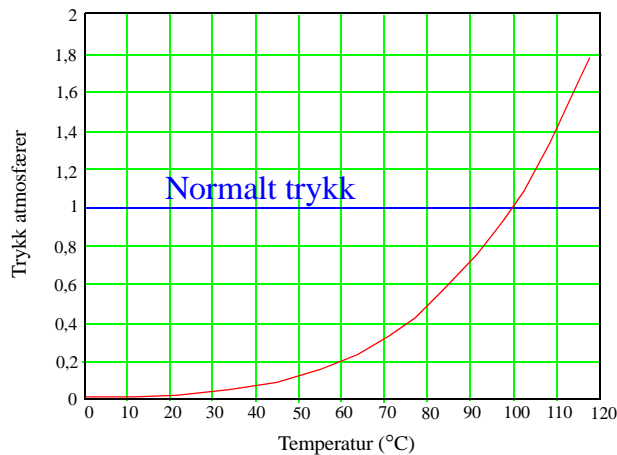
Fordampning skjer også før 100 °C er nådd, men bare fra overflata. Ved koking vil fordampningen foregå fra *hele* væsken, derav de store dampboblene som stiger opp. Studerer vi boblene, vil vi se at de vokser etter som de nærmer seg overflata. Dampen inne i boblene har et trykk, et *damptrykk*. Idet kokingen begynner, klarer væsken akkurat å produsere et damptrykk som er større enn trykket i væsken, slik at det oppstår ei boble. Ved bunnen må dampen overvinne både trykket fra luften og tyngden av vannet for at bobler skal oppstå. Ved overflata er det bare lufttrykket, derfor vil ei boble som løsner fra bunnen bli større når den stiger.



Ved lavt lufttrykk, for eksempel på høyfjellet, vil koking oppstå ved en lavere temperatur. På Galdhøpiggen koker vann ved ca. 92 °C. På Mount Everest er lufttrykket bare ca. 1/3 av lufttrykket ved havet, hvilket betyr at vann koker ved ca. 70 °C. Denne temperaturen er for lav til for eksempel å trekke te. Det betyr at tedrikkende fjellklatrerne bør ha med seg trykk-koker. Vannet klarer ikke å nå den temperaturen som trengs for at teen skal løse seg opp. For å heve



temperaturen ved koking kan man bruke trykk-kokere. På den måten kan en koke poteter ved høyere temperatur (for eksempel 120 °C), som gjør at det går fortere (ca. 30 %), og en sparer energi.



Eksperiment: 5 Kok vann ved 50°C

Figuren over viser hvordan kokepunktet varierer med trykket. Koking ved lave temperaturer og lavt trykk kan lett illustreres med følgende eksperiment:

Til dette eksperimentet trenger du en 20 ml sprøyte (uten spiss) og litt lunkent vann. Ta vann fra varmtvannskranen og fyll sprøyta ca. 1/4 med vann. Sørg for at det er minst mulig luft i sprøyta. Vannet kan være fra 50 °C til 80 °C. Hold for tuten med fingeren samtidig som du drar i håndtaket. Da vil du se at vannet inne i sprøyta koker.

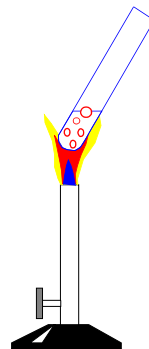


Når du trekker i håndtaket, senkes trykket over vannet, slik at kokepunktet senkes, og vannet koker kanskje helt ned mot 50 °C. Bruk et termometer og undersøkt hvor langt ned i temperatur du klarer å få vannet til å koke. Denne demonstrasjonen kan også gjøres på en annen måte.



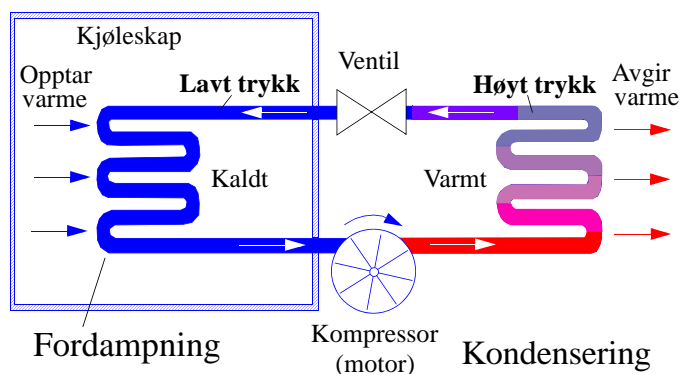
Ekspériment: 6 Vedlikehold koking ved avkjøling

Til dette eksperimentet trengs et reagensrør, en kork som tetter godt i reagensrøret, litt vann og en gassbrenner. Fyll reagensrøret 1/5 med vann. Kok opp vannet og sørg for at røret er fylt med vanndamp. Sett korken i reagensrøret med det samme du tar det bort fra flammen. Avkjøl toppen av reagensrøret og se hva som skjer med vannet.



Når vannet koker, vil reagensrøret være fylt med damp. Når vi setter korken i røret og avkjøler toppen av røret, vil dampen kondensere og trykket over vannet falle dramatisk. Dermed vil kokepunktet synke, og vannet holder seg kokende lenge. Er du heldig, kan du få vannet til å koke med varmen fra hendene. Som vi ser, bestemmes kokepunktet av trykket.

2.1.4 Kompressorens og ventilens funksjon



Kompressoren har altså en viktig funksjon. Den skal ikke bare sørge for at arbeidsmediet sirkulerer i rørsøyfa, men også sørge for at det er høyt trykk på kondenseringssiden og lavt trykk på fordampningssiden. Har vi valgt riktige arbeidsmedium, så vil vi kunne senke

trykket så mye at fordampning skjer selv ved temperaturer langt under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, og kondensering kan skje ved temperaturer på mange 10-talls grader pluss. Når trykket i dampen øker, vil den kondensere, samtidig som den avgir varme til rørene bak på kjøleskapet.



Ekspériment: 7 Sammentrykket luft blir varm I

Ta ei sykkelpumpe. Hold for tuten og trykk lufta i pumpa hardt sammen flere ganger. Hold rundt enden av pumpa. Kjenner du at den blir varm?

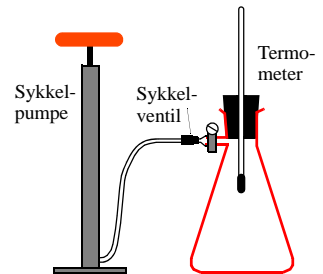


Den kraftige sammentrykningen, *kompresjonen*, gjør at temperaturen i den innestengte lufta øker, og enden av pumpa kjennes varm ut. Vi kan også trykke sammen pumpa uten å holde for tuten. Vi legger da merke til at den ikke blir særlig varm.

Ekspériment: 8 Sammentrykket luft blir varm II

Dersom du ønsker å gjøre effekten mer synlig, kan du gjøre følgende eksperiment:

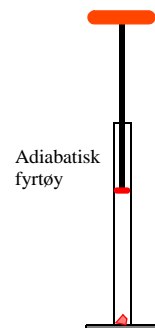
Bruk en erlenmeyerkolbe med en sideforgreining. Koble sideforgreining til en ventil og ei sykkelpumpe. Et termometer stikkes ned gjennom en kork med hull. Det er viktig at korken festes godt, gjerne med en skruklemme slik at den ikke spretter opp.¹ Registrer temperaturen i kolben, før du begynner å pumpe. Pump luft inn i kolben og registrer temperaturen. Hva skjer?



Ekspériment: 9 Adiabatisk fyrstøy

Et annet forsøk viser på en ganske dramatisk måte hvordan gass varmes opp ved kraftig kompresjon. Denne oppvarmingen er så kraftig at den brukes av enkelte urfolk til tenning av ild.

Enkelte læremiddelfirma selger adiabatisk fyrstøy, som består av en gjennomsiktig plast-sylinder som er tett i den ene enden og åpen i den andre. Ved hjelp av et stempel som kan



1. Dette laboratoriestyret er i salg hos KPT naturfag; <http://kptnaturfag.no/>.



skyves ned gjennom den åpne enden, er det mulig å komprimere lufta i sylindren. Dersom dette gjøres ved å slå stampelet ned i sylindren med stor kraft, kan en tenne et stykke sigarettpapir som legges i bunnen av sylindren. Det aller beste er imidlertid å bruke fibre av bomull som er svidd litt slik at det er helt tørt.

Dette eksperimentet viser at når gass trykkes sammen, tilføres energi, slik at gassen varmes opp. I tillegg vil gassen som har fått høyere trykk, ikke klare å holde på all dampen. Det skyldes at kokepunktet stiger med økt trykk. Store deler av dampen vil dermed kondensere og avgi varme.

Etter at arbeidsmediet har kondensert og gitt fra seg varme, kommer det til ventilen som slipper det ut i små porsjoner. Trykket foran ventilen er høyt, mens det etter ventilen er lavt. Idet det passerer ventilen, vil også arbeidsmediet passere veggen på vei inn i kjøleskapet. Når trykket synker dramatisk, vil kokepunktet synke, og arbeidsmediet som sirkulerer i rørene, vil begynne å koke, selv om temperaturen er ganske lav. Dermed vil væsken igjen fordampe og oppta varme fra omgivelsene som avkjøles.

Eksperiment: 10 Gass som utvider seg blir kald

At væske som utvider seg raskt, vil fordampe og oppta varme, kan vi registrere når vi spruter ut væske fra en sprayboks.

Ta en sprayboks med luftrensere og spray ut i lufta. Kjenn på boksen og dysehetta. Hva kjenner du?

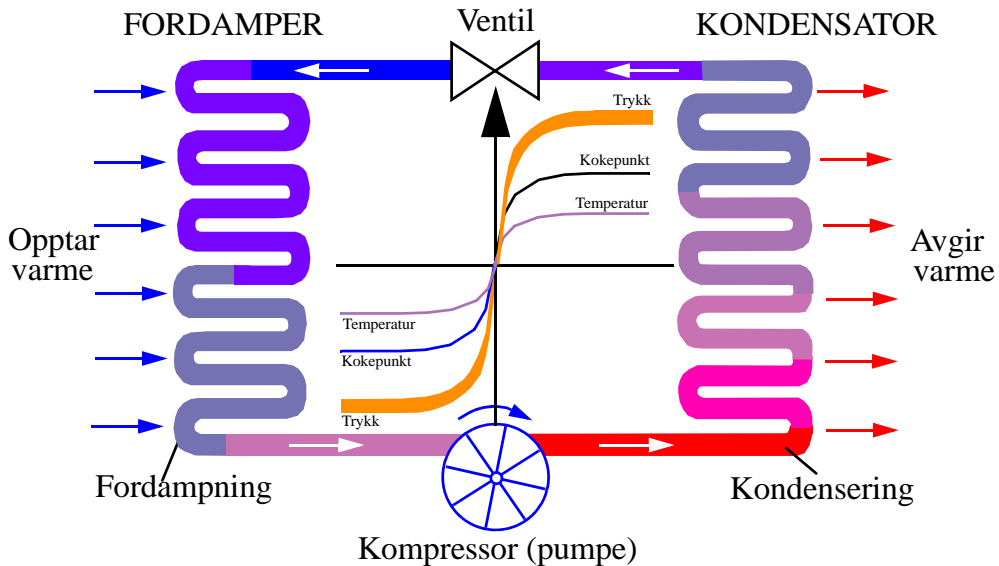


Når du spruter ut litt av innholdet i sprayboksen, blir boksen kald. Trykket inne i boksen blir mindre fordi noe av innholdet fordamper og tar varme fra omgivelsene. Dessuten vil du kjenne at dampen som kommer ut, er avkjølt. Slik er det også i varmepumpa. Når trykket i arbeidsmediet synker, synker kokepunktet, slik at mer av arbeidsmediet fordamper. Fordampningen tar varme fra omgivelsene inne i kjøleskapet som avkjøles. På denne måten transporterer arbeidsmediet varme fra innsiden til utsiden av kjøleskapet. Ønsker vi å varme opp et rom, snur vi varmepumpa. Vi plasserer da fordampningen på utsiden (opptar varme) og kondensatoren på innsiden (avgir varme).



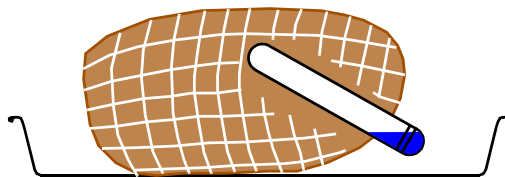
2.1.5 Oppsummering

Det geniale ved varmepumpa er altså knyttet til endringer av trykket i arbeidsmediet etter som det passerer gjennom systemet. Figuren under illustrerer hvordan trykket på kondensering og fordampningssiden endres, slik at fordampning kan skje ved lave temperaturer og kondensering ved høye temperaturer.



2.2 En gammel oppfinnelse

I USA, har de funnet en annen artig anvendelse for dette prinsippet.



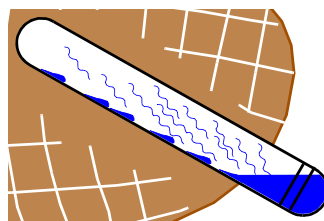
Tenk deg at du skal ha selskap og har glemt å sette steika i ovnen. Men du vet råd. Du tar et gammelt sigarettui² av metall, fyller i litt vann og skrur på lokket. Så lager du et hull i steika og stikker sigarettuet inn i hullet så det står litt på skrå oppover. **Og vips, så har du halvert steketida!**

2. I praksis trengs en beholder som minner om et sigarettui, som tåler trykket og er helt tett.



Hvilken forskjell kan et sigaretui gjøre med steiketida?

Som vi ser, stikker enden med vannet ut på undersiden. Der blir det varmet opp og fordamper. Dampen fordeler seg inne i etuiet og møter etter hvert den kjølige innsiden av steika. Vannet kondenserer dermed på innsiden av røret. Samtidig gir det fra seg mye varme til omgivelsene inne i steika, før det renner tilbake til bunnen og blir varmet opp på nytt. På denne måten varmes steika opp både innenfra og utenfra, og steketida går dramatisk ned.



Dette er egentlig en gammel oppfinnelse som har vært brukt i bakeriovnner. Inne i stekerommet i ovnen går det rør som inneholder damp. Når dampen kondenserer, vil den avgi varme samtidig som den renner tilbake til brennkammeret hvor den varmes opp på nytt.

2.3 Arbeidsmedier og p-h diagrammer

Egenskapene til arbeidsmediet er altså viktige. Mange ulike medier er brukt fra varmpumpene begynte å komme på markedet på begynnelsen av 1900-tallet. Før 1930 ble naturlige stoffer som eter (etyleter), svoveldioksid (SO_2), ammoniak, propan og isobutan brukt. Senere klarte man å utvikle syntetiske stoffer som KFK- (Klor-Fluor-Karboner) og HKFK-medier (Hydrogen-Klor-Fluor-Karboner), som fungerte ypperlig til formålet, helt til man oppdaget at de var ozonnedbrytende. Fra 1991 var det i Norge forbudt å bruke KFK-medier i nye anlegg, noe man faktisk kan ane konsekvensen av i dag. Tidlig på 90-tallet ble HFK-mediene introdusert (Hydrogen-Fluor-Karbon). Disse har derfor vært dominerende de seneste tiårene. I det siste har man imidlertid lyktes med å finne praktiske løsninger for å utnytte CO_2 som arbeidsmedium. Problemet med CO_2 som arbeidsmedium har vært de høye trykkene som kreves for å oppnå varmeavgivelse ved ønsket temperatur.

Et sentralt begrep er metningstrykk. La oss se litt på hva metningstrykk er før vi går videre.

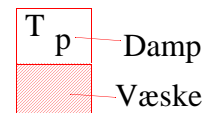


2.3.1 Metningstrykk [5]

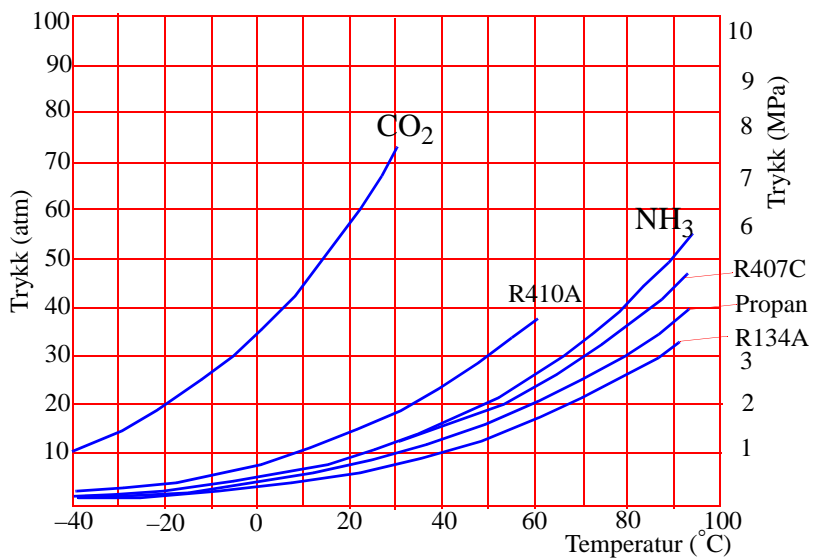
La oss tenke oss at vi har en lukket beholder som inneholder rent vann. I utgangspunktet er vannet fysisk atskilt med et lokk fra resten av beholderen som ikke inneholder noe vann eller vanndamp. Idet vi fjerner lokket, vil noe av vannet fordampe for så å kondensere til vann igjen. I starten vil det fordampe mer vann enn det kondenseres, men etter hvert vil det oppstå en balanse mellom fordampning og kondensering, og vi har nådd en metning.

Dampen vil på samme måte som lufta øve et visst trykk. Etter som mer vann fordamper, vil trykket som denne dampen øver, øke. Når det oppstått en balanse mellom fordampning og kondensering, kan ikke damptrykket øke mer, og dampen har nådd sitt *metningstrykk*. Størrelsen til metningstrykket vil variere med temperaturen. Ved høy temperatur vil metningstrykket være høyere enn ved lavere temperaturer. I praksis betyr det at varm luft kan inneholde mer vanndamp (gram vann/m³) enn kald luft.

Vi er imidlertid ikke avhengig av at vannet fordamper i luft. Dersom vi har en lukket beholder med en veske med vakuum over, vil det etter en tid også dannes damp over vesken. Vi kan måle trykket i denne dampen. Det viser seg at trykket i denne dampen (p) vil være konstant uavhengig av volumet, men avhengig av temperaturen (T).



Metningstrykket til arbeidsmediet er en viktig parameter. Figuren til høyre viser metningsstrykk som funksjon av temperatur for noen arbeidsmedier. R404A, R407A og R134A er HFK-medier.



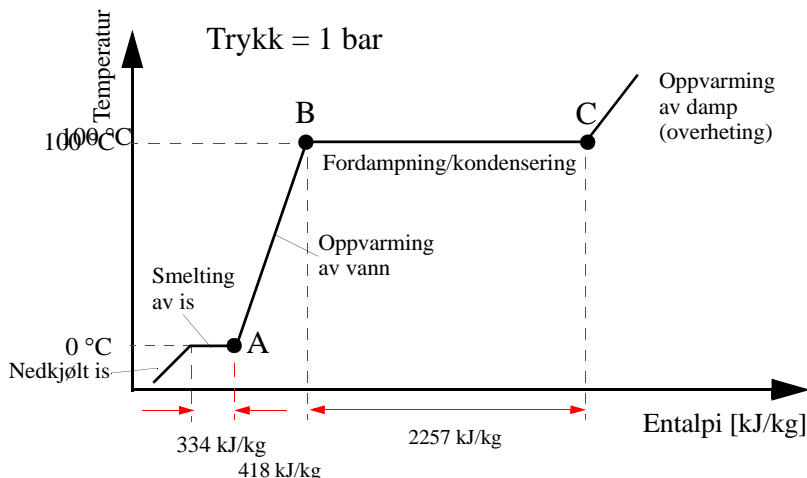


Vi kan merke oss at 1 atm er ca. 100 000 Pa eller 0,1 MPa, som gjerne er den måleenhet som brukes.

For at varmepumpa skal fungere på en tilfredsstillende måte, må vi forlange at vi kan oppnå tilstrekkelig fordampning ved *akseptable* lave trykk (større enn 1 bar), samtidig som vi kan oppnå nødvendig kondensering ved *akseptable* høye trykk (mindre enn 25 bar). I den forbindelse betyr *akseptable* at vi kan nøye oss med en billig kompressor. Av figuren over ser vi at bruk av CO₂ stiller større krav til utstyret, siden kompressoren må bringe CO₂ opp på et langt høyere trykk enn de mer tradisjonelle arbeidsmediene. Det vil også stille større krav til rør og koblinger for å unngå lekkasje.

2.3.2 p-h diagrammet³

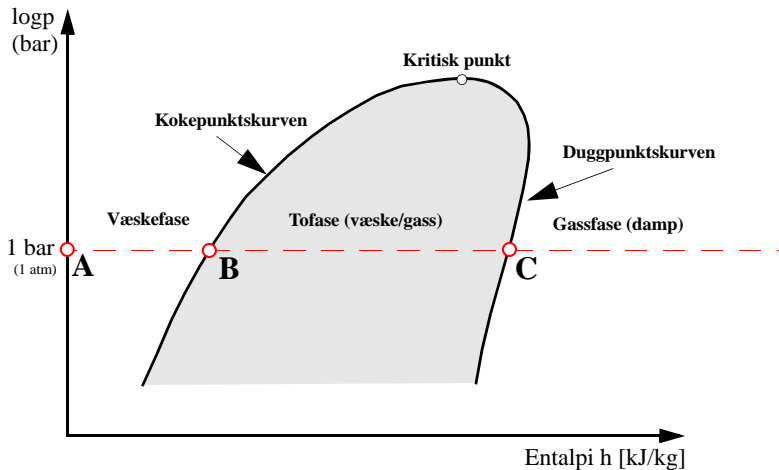
La oss se litt nærmere på hva som skjer idet væsken går over til damp. Vi tar utgangspunkt i energidiagrammet for vann som vi tidligere har studert. Her ser vi hvordan vannet går gjennom en rekke faseendringer når det tilføres varme. Ved A (0 °C) har isen gått over til vann. Ved B (100 °C) koker vannet, og fordampning skjer fra hele væskevolumet. Ved C er all væske gått over til damp. Tilføres ytterligere termisk energi, vil damptemperaturen øke, og vi sier at dampen er *overhettet*. Vi legger merke til at energiaksen angir energimengde pr. kg av stoffet. Energi pr. kg betegnes også *entalpi*.



3. Dette stoffet er hentet fra Jørn Stenes (SINTEF) foredrag og fra [6].



Plasseringen av faseovergangene A, B og C er imidlertid også avhengig av trykket. Vi kan dermed tegne et diagram som viser energimengde pr. kg ved de ulike faseovergangene, som funksjon av trykket over væsken (stoffet). Dersom vi kaller entalpien (energi/masse) for h , og trykket for p , kan vi tegne et såkalt p - h diagram.



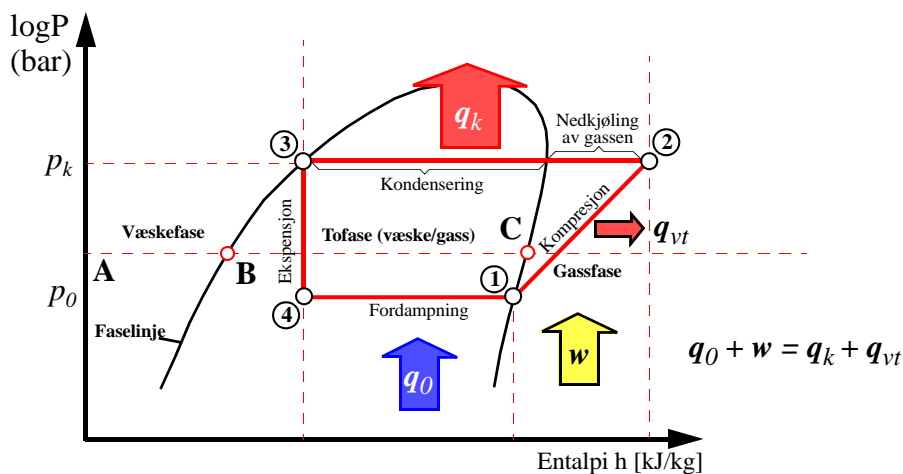
Vi kjenner igjen punktene A, B og C fra figuren foran. Disse antyder verdien til entalpien ved faseovergangen fra fast stoff (is – for vann) til væske (A), fra væske til gass (B – kokepunktet), og entalpien der *all* væske har gått over til damp (C). Til høyre for C vil dampen være overhettet. I området mellom B og C har vi en tofasetilstand, hvor noe av mediet er i væskeform, og resten er gått over til damp. I dette området brukes den tilførte energien til fordampning, mens temperaturen er konstant. Andelen damp øker etter hvert som vi nærmer oss C.

Venstre del av den buede kurven kalles *kokepunktskurven*. Vi legger merke til at nødvendig energiinnhold i mediet for at koking skal inntreffe, øker med økende trykk helt til vi kommer til det *kritiske punktet*. Over kritisk punkt vil mediet ikke fordampe når varme tilføres mediet, men temperaturen vil øke. Avkjølingskurvens forløp er bestemt av mediets tetthet og spesifikke varmekapasitet ved ulike temperaturer og trykk. Kurven til høyre for kritisk punkt kalles *duggpunktskurven*. Den angir verdien til entalpien (energi/kg) som funksjon av trykket hvor dampen begynner å kondensere.



Arbeidsmediene som brukes i varmepumper og kjøleskap, har lignende sammenhenger mellom trykk og entalpi. Vi skal bruke dette diagrammet til å vise hva som foregår når arbeidsmediet sirkulerer i varmepumpa eller kjøleskapet.

På figuren under uttrykker den trapeslignende kurven tilstanden til arbeidsmediet. La oss starte i tilstand 1.



4 – 1 Fordampning, 1 – 2 Kompresjon, 2 – 3 Kondensering, 3 – 4 Ekspansjon

Ved tilstand 1 er arbeidsmediet gått over i dampform. Trykket er relativt lavt (p_0), og arbeidsmediet er på vei inn i kompressoren. Fra tilstand 1 til 2 tilfører kompressoren energi (w) til arbeidsmediet, og trykket øker betraktelig (p_k). Idet arbeidsmediet går fra tilstand 2 til 3, kondenseres arbeidsmediet og avgir varme (q_k) til omgivelsene i kondensatoren. Ved tilstand 3 er arbeidsmediet i væskeform idet det møter ekspansjonsventilen, og trykket faller fra tilstand 3 til 4. I denne overgangen vil arbeidsmediet beholde sin entalpi, men befinne seg til høyre for kokepunktetskurven. Dermed vil arbeidsmediet fordampe og oppta termisk energi (q_0) fra omgivelsene, som avkjøles.

Slik sirkulerer arbeidsmediet i varmepumpa og opptar og avgir termisk energi. Generelt kan vi si:

- Høyt trykk gir høy temperatur, slik at det avgis varme til omgivelsene.
- Lavt trykk gir lav temperatur, slik at varme kan opptas fra omgivelsene.



Avhengig av om vi ønsker kjøling eller oppvarming, kan vi isolere fordamperen (kjøling) eller kondensatoren (oppvarming).

Vi kan sette opp energibalansen:

$$q_0 + w = q_k + q_{vt} \quad (2.1)$$

hvor q_0 er termisk energi opptatt i fordamperen, w er elektrisk energi tilført av kompressoren, q_k er avgitt termisk energi i kondensatoren og q_{vt} er energien som lekker ut av systemet. Kompressoren har også varmetap.

2.4 Pedagogisk forklaringsmodeller

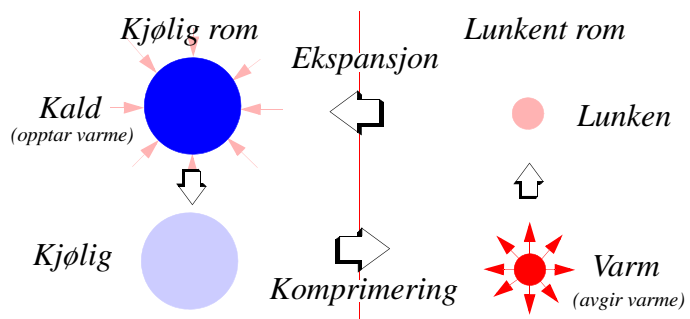
I dette avsnittet skal vi se på to ulike måter å formidle varmepumpas virkemåte på til elevene. Den første kaller vi “fotball/tennisball-modellen”, den andre kaller vi sirkulasjonsmodellen.

2.4.1 “Fotball/tennisball-modellen”

La oss tenke oss at vi har en beholder på størrelse med en fotball. Gassen inne i ballen er i utgangspunktet **kald**. Vi legger ballen i et **kjølig** rom hvor den kalde ballen tar til seg varme fra omgivelsene. La oss anta at den opptar 100 enheter varme. Dermed vil rommet omkring ballen avkjøles.

Så **komprimerer** vi ballen, slik at den blir på størrelse med en tennisball. Tennisballen inneholder fortsatt 100 varmeenheter, men fordi denne varmen er presset sammen på et

langt mindre volum, vil temperaturen stige betraktelig (se eksperiment 7, 8 og 9 foran). Samtidig som vi har komprimert ballen, har vi også flyttet den inn i et **lunkent** rom vi ønsker å varme opp. Siden ballen nå er varm, vil varme sive ut gjennom veggene i ballen og ut i rommet. Dermed vil ballen avkjøles, og temperaturen i rommet stige. La oss si at ballen etter avkjøling inneholder 50 enheter varme. Så ekspanderer vi ballen slik at den igjen blir på størrelse med

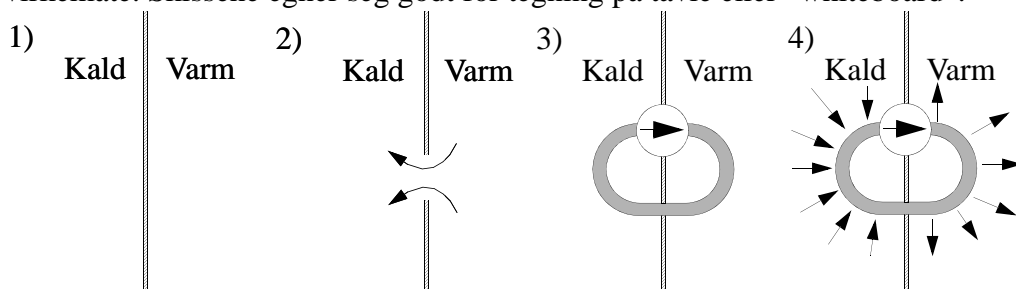




en fotball. Siden ballen fortsatt inneholder 50 enheter varme, vil temperaturen synke kraftig (se eksperiment 10). Samtidig med kompresjonen flytter vi ballen inn i det kjølige rommet. Men siden ballen nå er blitt kaldere enn det kjølige rommet, vil varme sive fra rommet over i ballen som igjen fylles til den har 100 varmeenheter. På denne måten flytter vi energi ved å flytte ballen fram og tilbake, samtidig som den ekspanderes og komprimeres. Den eneste energien vi trenger å tilføre utenfra, er for å flytte og komprimere ballen. Denne energien bidrar i praksis også til å varme opp ballen ytterligere. Ekspansjonen bruker av den indre energien i ballen og bidrar til avkjølingen.

2.4.2 Sirkulasjonsmodellen

I denne framstillingen skal vi gå meget langsomt og grundig til verks. Framstillingen kombinerer enkle skisser med eksperimenter som forklarer varmepumpas virkemåte. Skissene egner seg godt for tegning på tavle eller “whiteboard”.



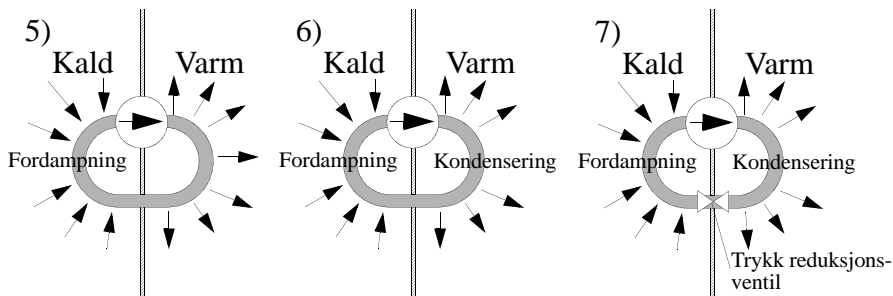
1. Vi tenker oss at vi har en vegg hvor det er varmt på den ene siden og kaldt på den andre.
2. Dersom vi lager et lite hull i veggen, vil varmen sive fra den varme siden over til den kalde. Etter noe tid, vil temperaturen i de to rommene bli like. At varme flyter fra et varmt til et kaldt sted, er det normale. Det skjer hele tida. Vår utfordring er å flytte varme fra den kalde siden og over til den varme siden av veggen. Vi må ikke glemme at selv om temperaturen er lav (under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), så er det fortsatt energi (varme) til stede.
3. Vi lager oss ei rørsløyfe som dels er på den kalde og dels på den varme siden av veggen. Så setter vi inn ei pumpe i rørsystemet slik at væsken som røret er fylt med, sirkulerer.



4. Vi ønsker at varme skal strømme **inn i** røret og væsken som sirkulerer på venstre side, og at varmen skal strømme **ut av** røret på høyre side. På den måten kan vi pumpe varme fra den kalde til den varme siden.

Mange elever vil på dette tidspunktet protestere og si at: “*Vil ikke varmen sive inn i røret på høyre side og ut på venstre?*” Det er et helt korrekt. Det vi har tegnet, er det vi ønsker oss, men som vi ennå ikke har fått til. La oss se først se hvordan væsken kan oppta varme.

På dette tidspunktet er det naturlig å demonstrere fordampning av eter eller parfyme på hånda (eksperiment 1). Elevene vil kjenne at eteren gjør huden kald idet den fordamper. Fordampning krever varme som blir tatt fra omgivelsene, i dette tilfelle huden.



5. Klarer vi å få væsken i røret på venstre side til å **fordampe**, vil det sive varme inn i røret. Hvordan kan vi så få væske til å avgi varme på høyre side?

På dette tidspunktet demonstreres kondensering av damp mot en kjølig metallplate (eksperiment 2). Elevene kjenner at plata blir varm når dampen kondenseres.

6. Klarer vi å få væsken i røret på høyre side til å kondensere, vil det sive varme ut av røret.

Men det er noe galt her. Fordampning skjer mest effektivt på den siden temperaturen er høyest, mens kondensering skjer helst der det er kjølig. I vårt tilfelle synes det å være omvendt. Utfordringen er derfor å finne ut hvordan vi kan oppnå fordampning i kjølige omgivelser og kondensering der det er varmt.

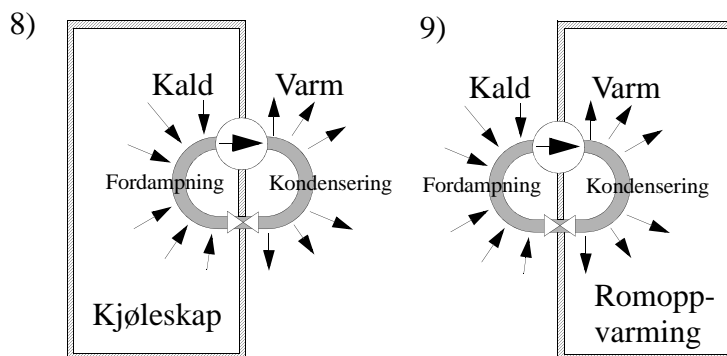
Vi vet at fordampningen er størst når en væske koker. Får vi væsken i røret på venstre side til å koke selv om det er kjølig, så har vi kanskje løst et av problemene.



Vann koker vanligvis ved 100 °C. La oss se om vi klarer å få vann som holder 50 °C, til å koke.

På dette tidspunktet gjennomfører vi eksperiment 5, koking av vann under lavt trykk. Elevene får hver sin sprøyte og tilgang på litt lunket vann. Ved å senke trykket, ser de at vannet bobler og koker. Ved å gjøre trykket tilstrekkelig lavt (lage sug) i røret på venstre side, kan vi få væsken i røret til å koke til tross for at den er kjølig. På tilsvarende måte kan vi få kondensering i rørene på høyre side ved å øke trykket.

7. Vi trenger altså lavt trykk på venstre side og høyt trykk på høyre side. For å skille de to sidene fra hverandre, må vi sette inn en trykkreduksjonsventil i røret som fører fra den varme til den kalde siden. Denne ventilen er egentlig bare et lite hull. Når den varme væsken under høyt trykk presses gjennom ventilen, vil trykket og temperaturen falle. Det samme skjer når vi trykker på ventilen til en sprayboks (eksperiment 10). Vi kjenner at dusjen som kommer ut gjennom dysa, er kald.



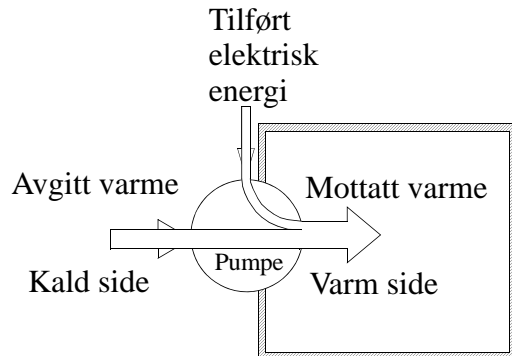
8. Dersom vi isolerer den kalde siden, vil vi få et kjøle- eller fryseskap. Denne løsningen vil også fungere som romavkjøling en varm sommerdag.
9. Dersom vi isolerer den varme siden, vil vi få et system for romoppvarming.

I de neste delkapittelet skal vi gjøre eksperimenter med fordampning og kondensering av vann, og etter hvert måle varmefaktoren til ei varmepumpe.



2.4.3 Varmefaktor

For å forklare varmfaktoren til ei varmepumpe, er det enklest å betrakte den som ei blokk som vist på figuren til høyre.



Ei varmepumpe pumper varme fra den kalde (avgitt varme) til den varme siden (mottatt varme). For å få til dette må vi tilføre pumpa elektrisk energi (*tilført energi*). Som vi skjønner av figuren, så er vi i dette tilfellet mest opptatt av hvor mye varme vi kan få inn i rommet vårt. Den varmen vi henter fra utsiden av rommet på kald side, er gratis. Mens den energien vi henter fra det elektriske nettet for å drive pumpa, må vi kjøpe. Vi ønsker derfor å bruke minst mulig tilført elektrisk energi og ta mest mulig varme fra utsiden (kald side).

Varmefaktoren angir forholdet mellom mottatt varme som vi kan nyttiggjøre oss, og den tilførte elektriske energien som vi betaler for. Jo større dette forholdet er jo mer lønnsom er varmepumpa.

$$\text{Varmefaktoren} = \frac{\text{Mottatt energi}}{\text{Tilført elektrisk energi}} \quad (2.2)$$

2.5 Laboratorieoppgaver, varmepumper

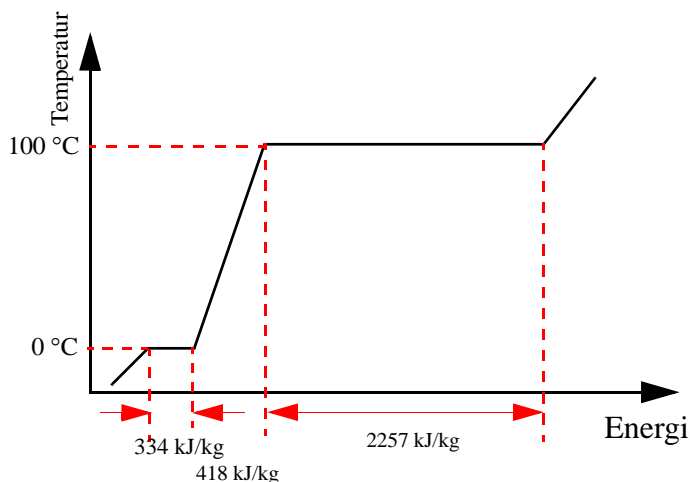
Dette delkapittelet beskriver noen grunnleggende laboratorieoppgaver for å øke forståelsen for varmepumpas virkemåte.

2.5.1 Måling av kondensasjonsvarmen til vann

Dette laboratorieforsøket illustrerer at den termiske energien i vanndamp er vesentlig mye større enn energien i varmt vann med samme temperatur. Det er en



egenskap som utnyttes i varmepumper. For vann ved 1 atm trykk gjelder følgende:



Diagrammet viser hvor mange kilojoule (kJ) som skal til for å føre 1 kg is over til vann, og tilsvarende for å føre 1 kg vann ved 100 °C over til damp med samme temperatur. Som vi ser, skal det en betydelig mengde varme til for å bringe vann over til damp, og mye mer for å føre is over til væske. En del av denne energien brukes til utvide væsken til gass (det vil si bryte bindingene mellom vannmolekylene), men mesteparten brukes til å øke energiinnholdet i dampen. Ved et trykk på 1 atm, regner vi med at dampen tar ca. 1675 ganger så stor plass som den tilsvarende væskemengden.

I det neste forsøket skal vi styrke denne antagelsen.

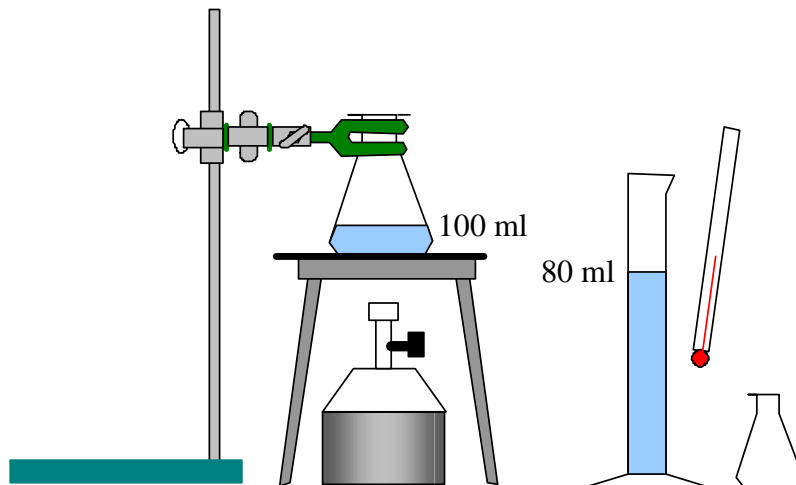
2.5.2 Måling av temperaturøkning tilsatt 5 ml kokende vann

Utstyr

- Erlenmeyerkolbe (250 ml) med ca. 100 ml med vann
- Kork med hull
- 2 glassrør bøyd i 90 °C vinkel
- Gummislange
- 1 målesylinder (100 ml)
- Termometer



- Kokestativ med nett
- Stativ med fot og klype
- Isoporkloss (etter behov)
- Gassbrenner
- Fyrstikker
- Begerglass/kolbe 100 ml



Framgangsmåte

1. Fyll akkurat 80 ml vann i målesylindren og mål temperaturen (t_1) på vannet (noter).
2. Fyll ca. 100 ml vann i erlenmeyerkolben.
3. Sett kolben på stativet og fest den til stativet med klypa.
4. Tenn gassbrenneren, og kok opp vannet uten å ha satt på korken med glassrør.
5. Mål temperaturen (t_2) på det kokende vannet (unngå å berøre bunnen med termometeret). Noter.
6. Hell ca. 5 ml kokende vann fra erlenmeyerkolben over i målesylindren. Rør godt rundt med termometeret. Les av nøyaktig hvor mye vann (m_2) som har blitt tilført. Noter i gram.
7. Mål temperaturen på vannet i målesylindren (t).



Gjenta forsøket om ønskelig.

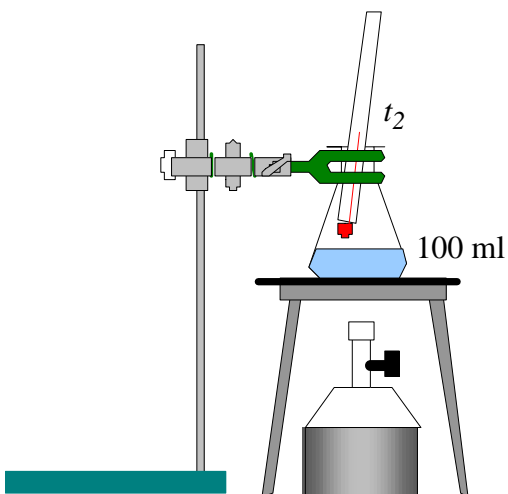
Måling nr.	Mengde vann i sylinder før tilsatt varmt vann (m_1)	Temp. i sylinder før tilsatt varmt vann (t_1)	Mengde varmt vann tilført målesylinder (m_2)	Temp. i varmt vann i kolbe (t_2)	Temp. i målesylinder etter tilsatt varmt vann (t)	Kommentar
1						
2						

Regn om fra milliliter til gram. Legg merke til at 1 ml vann = 1 gram.

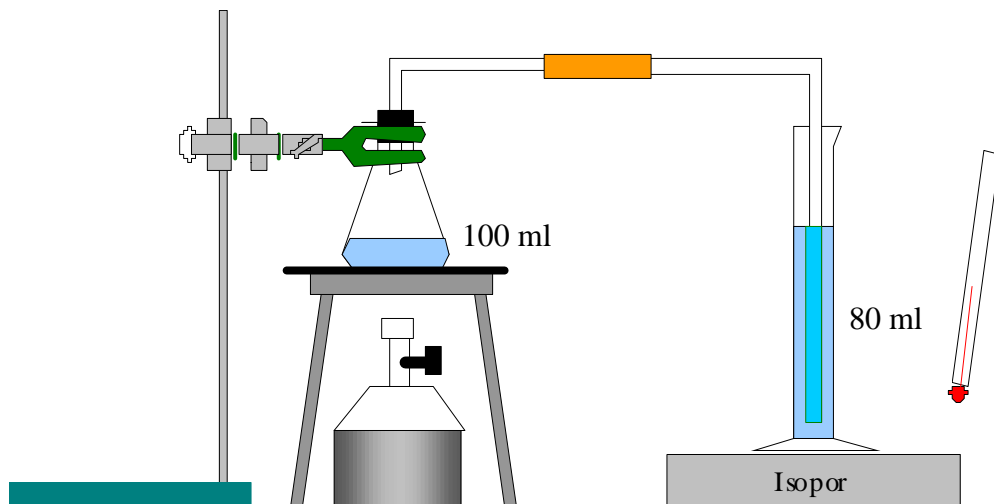
2.5.3 Måling av temperaturøkning tilsatt damp tilsvarende 5 ml vann

Framgangsmåte

1. Fyll på nytt akkurat 80 ml vann (m_1) i målesylinderen og mål temperaturen på vannet. Noter.
2. Kok opp vannet på nytt uten at glassrørene er tilkoblet, som vist på figuren til høyre.
3. Mål temperaturen (t_2) på dampen rett over vannflata når vannet koker. Noter.



4. Før røret med damp fra erlenmeyerkolben ned i vannet i målesylindren.



5. La slangen gå langt ned i vannet – helst ned til bunnen av målesylindren. La røret med damp stå slik til det er tilført like mye væske som i del 1 av forsøket. Rør godt rundt med termometeret.

6. Mål temperaturen (t) etter at 5 ml vann er tilført som damp. Noter.

Gjenta forsøket om ønskelig.

Måling nr.	Mengde vann i sylindrer før tilsatt damp (m_1)	Temp. i sylindrer før tilsatt damp (t_1)	Mengde damp tilført målesylindrer (m_2)	Temp. i damp i kolben (t_2)	Temp. i målesylindrer etter tilsatt damp (t)	Kommentar
1						
2						

Observasjoner

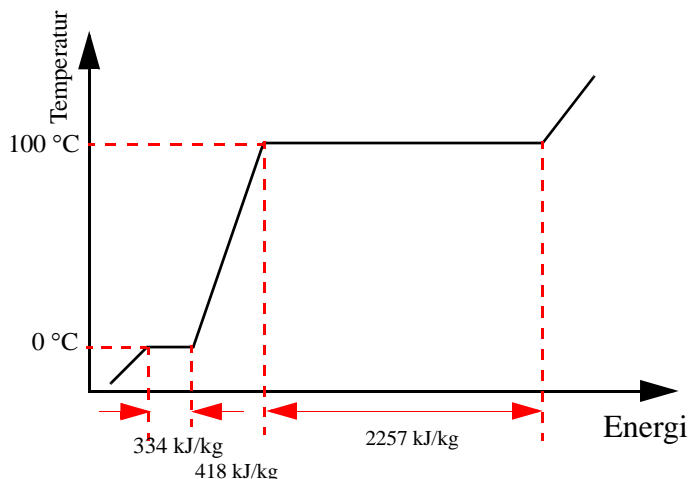
Hvordan var temperaturen på vanddamp i forhold til kokende vann? Var det forskjell på temperaturstigningen i de to forsøkene, og hvordan forklares det?



Det neste delkapittelet beskriver hvordan måleresultatene kan brukes til å beregne spesifikk varmekapasitet for vanndamp.

2.5.4 Beregning av kondensasjonsvarmen til vanndamp

Vanndamp med temperatur 100 °C inneholder mye mer energi enn vann av samme temperatur (se figuren under).



Vi skal her måle kondensasjonsvarme for vann. Men først må vi se litt på teorien.

2.5.5 Teorigrunnlag

Den varmemengden som et stoff inneholder, bestemmes av stoffets *masse*, dets *temperatur* og dets evne til å oppta *varme*. Stoffets evne til å oppta varme angis med stoffets *spesifikke varmekapasitet* (c_0) og er forskjellig fra stoff til stoff. Det betyr at det skal forskjellig mengde varme til for å varme opp 1 kg vann og 1 kg jern, 1 grad Kelvin. Det skal dessuten mer energi til for å varme opp en stor mengde stoff, framfor å varme opp en liten mengde stoff.

Varmemengden Q som skal til for å varme opp massen m fra temperaturen t_1 til t_2 , kan skrives som

$$Q = c_0 m (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$



Varmemengde (Q), måles i joule (J), massen (m) i kg, temperaturen (t) i grader (Kelvin eller grader Celcius). c_0 får da benevnningen kJ pr. kg og grader.

For et stoff av en spesiell utforming og masse, som for eksempel en kolbe eller målesylinder, kan vi slå sammen den spesifikke varmekapasiteten og massen, siden innretningen alltid vil ha samme masse, og kalle denne for innretningens varmekapasitet C . Den varmemengden som skal til for å varme opp innretningen fra temperaturen t_1 til t_2 , kan da skrives som

$$Q = C (t_2 - t_1) \quad (2.4)$$

På lignende måte kan vi definere den varmemengden som skal til for å gjøre om 1 kg vann til 1 kg damp med samme temperatur. Denne varmemengden kaller vi *fordampningsvarmen*, l . Trenger vi en spesiell varmemengde for å føre 1 kg vann over til 1 kg damp, får vi den samme varmemengden tilbake når dampen kondenserer til vann. Setter vi Q lik den varmemengden som skal til for å føre vannmengden m over til damp, kan vi skrive:

$$Q = l m \quad (2.5)$$

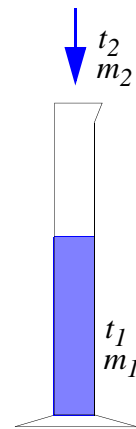
Vi legger merke til at vi kan sløyfe temperaturen, siden vi antar at dampen har samme temperatur som det kokende vannet.

Nå kan vi sette opp varmemengde-ligningen for forsøket vårt. La oss begynne med varmemengden som overføres når vi heller 5 ml kokende vann i målesylinderen.

$$Q_{\text{varmt vann}} = Q_{\text{kaldt vann}} + Q_{\text{sylinder}} \quad (2.6)$$

Den varmemengden som det varme vannet avgir ($Q_{\text{varmt vann}}$), må være lik varmemengden som det kalde vannet i målesylinderen mottar ($Q_{\text{kaldt vann}}$), pluss varmemengden selve målesylinderen m/termometer mottar (Q_{sylinder}) (her inngår også tap til omgivelsene). Skriver vi denne ligningen fullt ut, får vi

$$c_0 m_2 (t_2 - t) = c_0 m_1 (t - t_1) + C(t - t_1) \quad (2.7)$$



t er den temperaturen vi ender opp med i målesylinderen etter at det varme vannet er tilført.



La oss anta at oppvarmingen av målesylindren betyr lite for forsøket. Da kan vi stryke det siste leddet i ligning (2.7), og vi kan løse ligningen for å finne den forventede temperaturen i målesylindren etter at det varme vannet er tilført.

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} \quad (2.8)$$

Bestem apparatets varmekapasitet

Dersom vi kjenner spesifikk varmekapasitet for vann, kan vi bruke de målte temperaturene til å finne apparaturens varmekapasitet, C . Løser vi ligning (2.7) mht. C , får vi

$$C = \frac{c_0(m_2(t_2 - t) - m_1(t - t_1))}{(t - t_1)} \quad (2.9)$$

hvor $c_0 = 4.19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Det vil si c_0 er den varmemengden som skal til for å varme opp 1 kg vann én grad.

2.5.6 Måling av kondensasjonsvarmen til vanddamp, et måleeksempel

Her gjennomfører vi et måleeksempel slik at vi kan få et inntrykk av hva det er mulig å oppnå av resultater.

Vi fyller en målesylinder med 80 ml (0,08 kg) vann og måler temperaturen i vannet til $21,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Vi tilsetter 5 ml (0,005 kg) kokende vann med en temperatur på $98,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Måling nr.	Mengde vann i målesylinder før tilsatt varmt vann (m_1)	Temp. i målesylinder før tilsatt varmt vann (t_1)	Mengde varmt vann tilført målesylinder (m_2)	Temp. i varmt vann i kolbe (t_2)	Temp. i målesylinder etter tilsatt varmt vann (t)	Kommentar
1	0,08 kg	21,8 °C	0,005 kg	98,5 °C	25 °C	



Vi beregner forventet temperatur med ligning (2.8) og får

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} = \frac{0,08 \cdot 21,8 + 0,005 \cdot 98,5}{0,08 + 0,005} = 26,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.10)$$

Målingene viser at vannet holder $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ etter at det kokende vannet er tilsatt målesylindren. Vi har altså et avvik på $1,3 \text{ } ^\circ\text{C}$, som er relativt mye. Vi antar at dette skyldes tap av varme til måleoppsettet. Ved hjelp av ligning (2.9) vil vi bestemme instrumentenes varmekapasitet.

$$C = \frac{c_0(m_2(t_2 - t) - m_1(t - t_1))}{(t - t_1)} \quad (2.11)$$

$$\frac{4,19(0,005(98,5^\circ - 25^\circ) - 0,08(25^\circ - 21,8^\circ))}{25^\circ - 21,8^\circ} = 0,146 \text{ kJ/K kg} \quad (2.12)$$

Denne verdien skal vi ta med oss når vi skal beregne kondensasjonsvarmen.

I det neste forsøket skal vi lede 5 ml (0,05 kg) damp ned i vannet i målesylindren slik at vannstanden i målesylindren øker med 5 ml. Vi skal også måle temperaturen vi får.

Vi setter igjen opp ligningen som beskriver overføringen av varme fra dampen til vannet i målesylindren:

$$Q_{\text{damp}} + Q_{\text{varmt vann}} = Q_{\text{kaldt vann}} + Q_{\text{sylinder}} \quad (2.13)$$

Først avgir dampen varme idet den kondenserer (Q_{damp}). Deretter avgir det kondenserte vannet varme ($Q_{\text{varmt vann}}$) til det kalde vannet ($Q_{\text{kaldt vann}}$) og til målesylindren og termometeret (Q_{sylinder}). Vi setter inn uttrykkene for de ulike varmemengdene og får

$$l m_2 + c_0 m_2 (t_2 - t) = c_0 m_1 (t - t_1) + C (t - t_1) \quad (2.14)$$

Her er l kondensasjonsvarme, C er varmekapasiteten til måleutstyret, og t er den temperaturen vi ender opp med i målesylindren. Løser vi denne ligningen mht. på vandampens kondensasjonsvarme l , får vi



$$l = \frac{c_0 m_1 (t - t_1) + C(t - t_1) - c_0 m_2 (t_2 - t)}{m_2} \quad (2.15)$$

Alternativt kan en ta utgangspunkt i at kondensasjonsvarmen er kjent og lik $l = 2257 \text{ kJ/kg}$, for så å beregne den forventede temperaturstigningen t .

$$t = \frac{(c_0 m_1 + C)t_1 - (c_0 t_2 + l)m_2}{(c_0(m_1 + m_2) + C)} \quad (2.16)$$

Eksempel

La oss ta utgangspunkt i målinger og se om vi kan beregne kondensasjonsvarmen (som er den samme som fordampningsvarmen for vann) for vanddamp.

Følgende verdier er målt:

Måling nr.	Mengde vann i sylinder før tilsatt damp (m_1)	Temp. i sylinder før tilsatt damp (t_1)	Mengde damp tilført målesylinder (m_2)	Temp. i dampen fra kolben (t_2)	Temp. i målesylinder etter tilsatt damp (t)	Kommentar
1	0,08 kg	22 °C	0,05 kg	97,2 °C	48 °C	

I tillegg har vi målt varmekapasiteten til måleutstyret til $C = 0,146 \text{ kJ/K kg}$.

Dersom vi setter inn i ligning (2.15) får vi:

$$C = \frac{4,19 \cdot 0,08(48 - 22) + 0,146(48 - 22) - 4,19 \cdot 0,005(97,2 - 48)}{0,005} = 2296,1 \text{ kJ/K} \quad (2.17)$$

Dette er et avvik på

$$\frac{(2296,1 - 2257)100\%}{2257} = 1,7 \% \text{ avvik} \quad (2.18)$$



Hvilket er langt bedre enn forventet.

2.6 Målinger på varmepumpe, demonstrasjonsmodell

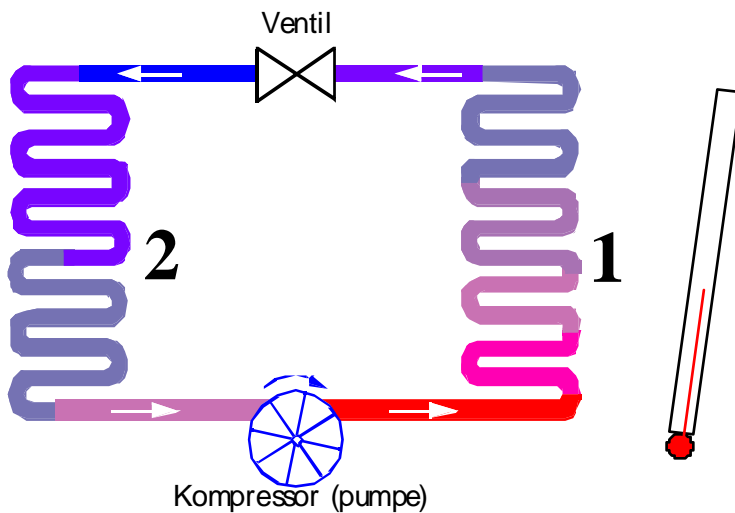
Vi har brukt en lett modifisert versjon av KPT Naturfags varmepumpe. I denne modellen har vi installert en strupeventil mellom varmsiden og kaldsiden.

2.6.1 Måling av varmefaktor

Utstyr

- Varmepumpe med varmeisolert vannbeholdere på varmsiden
- 2 termometere
- Klokke
- Effektmeter

Figuren under gjengir en prinsippskisse av varmepumpa.



Angi på figuren

- På hvilken side tilføres varme?
- På hvilken side avgis varme?



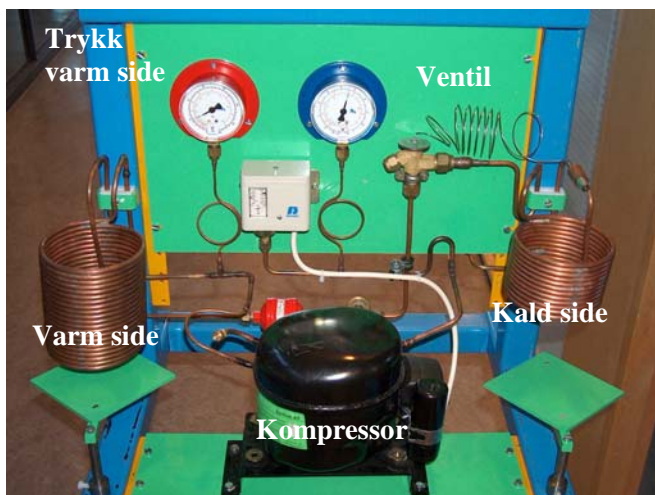
- På hvilken side skjer det kondensering?
- På hvilken side skjer fordampning?
- På hvilken side er det lavt trykk?
- På hvilken side er det høyt trykk?
- Hvilken vei pumpes varmen?

Vi skal nå finne ut hvor effektiv denne pumpa er ved å bestemme forholdet mellom mottatt varme på varmsiden og tilført elektrisk energi. Dette forholdet kaller vi varmefaktoren (VF) til varmepumpa:

$$V_F = \frac{\text{Mottatt energi}}{\text{Tilført energi}} \quad (2.19)$$

For å finne *mottatt energi* må vi måle vanntemperaturen på *varm side* over tid. For å finne *tilført elektrisk energi* måler vi elektrisk *effekt* over litt tid. For virkelig å se at vi pumper varme, gjør vi også målinger på den *kalde siden*.

Framgangsmåte, stor pumpe⁴



1. Sett en termos rundt kobberrørspiralen på venstre side, som er den varme siden, og ei plastbøtte på høyre.

4. Levert av KPT, varenummer: 28250 (<http://kptnaturfag.no/shop/28250>).



2. Fyll opp termosene til venstre med 2,5 liter vann og sett isoporlokket på. Noter massen til vannet på varm side (m_v) i lista under.
3. Fyll opp plastbøtta til høyre med 5 liter vann, slik at vannet står over kobber-rørspiralen. Noter massen til vannet på kald side (m_k) i lista under.
4. Mål lufttemperatur ved oppstart.
5. Mål temperaturen i begge karene og noter i tabellen. Det er viktig å røre godt under målingene siden det varme vannet har en tendens til å samle seg øverst, og det kalde nederst i beholderne.
6. Start kompressoren og start klokka.
7. Les av effektforbruket på effektmåleren og noter i tabellen.
8. Les av temperaturene og effekten med 3 minutters mellomrom og noter i tabellen.
9. Les av trykket på varm og kald side med 3 minutters mellomrom og noter i tabellen.

Massen til vann på varm side (m_v):.....kg

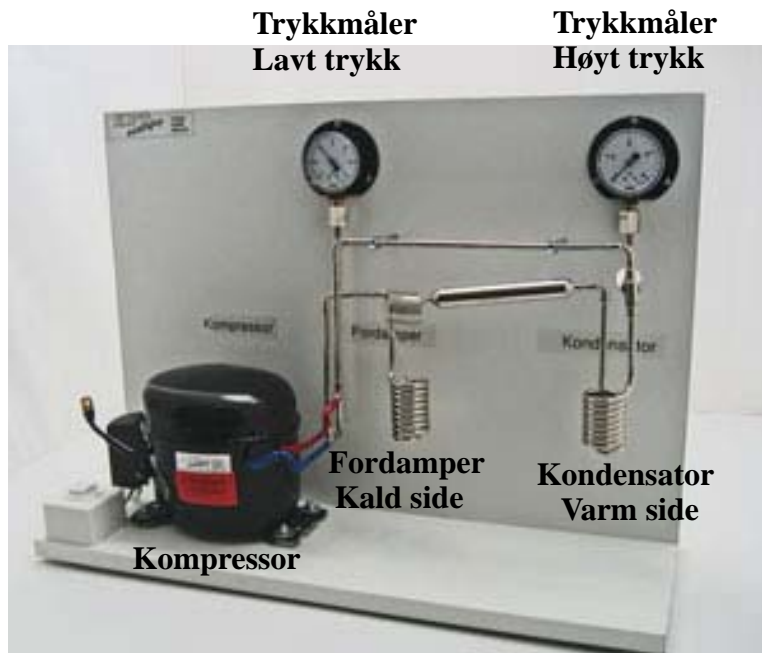
Massen til vann på kald side (m_k):.....kg

Lufttemperaturen ved oppstart (t_l):.....°C

Tid fra start	Temperatur (°C)		Trykk (bar)		Tilført elektrisk effekt (Watt)
	Varm side	Kald side	Varm side	Kald side	
Oppstart					
0 min	°C	°C	bar	bar	W
3 min	°C	°C	bar	bar	W
6 min	°C	°C	bar	bar	W
9 min	°C	°C	bar	bar	W
12 min	°C	°C	bar	bar	W
Temperaturøkning	°C	°C			Gjennomsnitt: W



Framgangsmåte, liten pumpe⁵



1. Sett et begerglass rundt kobberørspiralene på venstre side, som er den varme siden, og et begerglass på høyre side, som er den kalde siden.
2. Fyll opp begerglasset til venstre med 0,5 liter⁶ vann. Noter massen til vannet på varm side (m_v) i lista under.
3. Fyll opp begerglasset til høyre med 0,5 liter⁶ vann slik at vannet står over rørspiralen. Noter massen til vannet på kald side (m_k) i lista under.
4. Mål lufttemperatur ved oppstart.
5. Mål temperaturen i begge begerglassene og noter i tabellen. **Det er viktig å røre godt under målingene siden det varme vannet har en tendens til å samle seg øverst, og det kalde nederst i begerglassene.**
6. Start kompressoren og la den gå i to minutter.

5. Levert av KPT, varenummer: 28260 (<http://kptnaturfag.no/shop/28260>).

6. For å få opp varmekoeffisienten anbefales sterkt å øke dimensjonene på begerglassene gjerne til 2,0 - 2,5 liter om det er plass.



7. Start klokka og les av temperaturene.
8. Les av effektforbruket på effektmåleren og noter i tabellen.
9. Les av temperaturene og effekten med 1 minutts mellomrom og noter i tabellen.
10. Les av trykket på varm og kald side med 1 minutts mellomrom og noter i tabellen.

Massen til vann på varm side (m_v):.....kg

Massen til vann på kald side (m_k):.....kg

Lufttemperaturen ved oppstart (t_l):.....°C

Om det blir for travelt, dropp måling av trykket.

Tid fra start	Temperatur (°C)		Trykk (bar)		Tilført elektrisk effekt (Watt)
	Varm side	Kald side	Varm side	Kald side	
Oppstart					
0 min	°C	°C	bar	bar	W
1 min	°C	°C	bar	bar	W
2 min	°C	°C	bar	bar	W
3 min	°C	°C	bar	bar	W
4 min	°C	°C	bar	bar	W
5 min	°C	°C	bar	bar	W
Temperaturøkning	°C	°C			Gjennomsnitt: W



Beregning av pumpas varmefaktor

1. Beregn temperaturøkningen på varm siden (Δt_v): _____ grader.
Temperaturøkningen er sluttemperatur minus starttemperatur.
2. Beregn temperaturreduksjon på kald siden (Δt_k): _____ grader.
Temperaturreduksjon er starttemperatur minus sluttemperatur.
3. Beregn gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk (P_e): _____ W.
Se på effektmålingene og anslå et gjennomsnitt.
4. Måleperiode (ΔT): _____ sek.
5. Beregn avgitt energi til fordampere (kald side) (Q_K). Det gjøres slik:

Spesifikk varmekapasitet $c_0 = 4.18 \cdot 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{grad)}$

$$Q_K = c_0 \cdot m_k \cdot \Delta t_k = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{J}$$

6. Beregn mottatt energi fra kondensatoren (varm side) (Q_V):

$$Q_V = c_0 \cdot m_v \cdot \Delta t_v = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{J}$$

7. Levert energi til kompressoren (E_e):

$$E_e = P_e \cdot \Delta T = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{J}$$

8. Ideelt skulle vi ha fått tilført varmemengde på varm siden (Q'_V):

$$Q'_V = Q_K + E_e = \dots\dots\dots \text{J}, \quad \text{Beregnet mottatt energi } Q_V = \dots\dots\dots \text{J}$$

Finn avviket mellom Q'_V og Q_V Drøft årsakene til avviket.

.....
.....
.....

9. Vi kan nå beregne varmefaktoren til pumpe som forholdet mellom mottatt energi på varmsiden og tilført elektrisk energi:



$$V_F = \frac{\text{Mottatt energi}}{\text{Tilført energi}} = \dots\dots\dots (2.20)$$

Generelle formler

Elektrisk energi (J) = effekt (Watt) · tid (sekund) [$E_e = P_e \cdot \Delta T$]

Tilført varme (J) = 4180 (J/kg · grad) · temperaturforandring (°C) ·
vannmengde (kg) [$Q = c_0 \cdot \Delta t \cdot m$]

Spesifikk varmekapasitet for vann: $c_0 = 4,18 \cdot 10^3$ J/K kg

Drøfting:

Drøft ulike feilkilder

.....
.....
.....
.....
.....

2.6.2 Måling av varmefaktor for varmepumpa, et måleeksempel

Vi skal nå gjennomføre en måleserie for å vise hva vi kan forvente oss av resultater. Vi gjør målinger over et noe lengre tidsintervall, slik at vi i større grad kan finne ut hvordan pumpa fungerer. Vi leser av:

Massen til vann på varm side (m_v): 2,5 kg

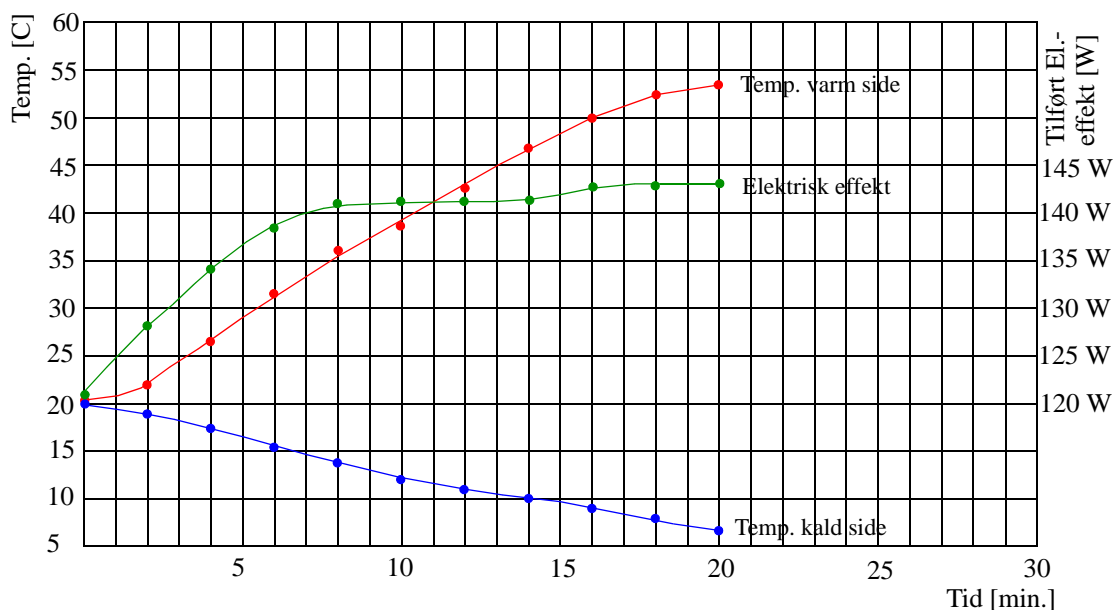
Massen til vann på kald side (m_k): 5,0 kg

Lufttemperaturen ved oppstart (t_l): 20 °C



Tid fra start	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Temp. varm side	20,5 °C	22,2 °C	27 °C	32 °C	36,2 °C	38,5 °C	42,7 °C	47 °C	50 °C	52,5 °C	53,5 °C
Temp. kald side	20 °C	19 °C	17,5 °C	15,5 °C	14 °C	12 °C	11 °C	10 °C	9 °C	8 °C	7 °C
Elektrisk effekt	121 W	128 W	134 W	138 W	141 W	141 W	141 W	141 W	143 W	143 W	143 W
Trykk varm side	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
Trykk kald side	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar

Vi kan framstille temperaturendringene som funksjon av tida:



Beregning av pumpas varmefaktor

1. Beregn temperaturøkning på varmsiden (Δt_v): **33** grader.
Temperaturøkningen er slutttemperatur minus starttemperatur.
2. Beregn temperaturreduksjon på kaldsiden (Δt_k): **13** grader.
Temperaturreduksjon er starttemperatur minus slutttemperatur.
3. Beregn gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk (P_e): **140** W.
Se på effektmålingene å anslå et gjennomsnitt.



4. Måleperiode (ΔT): 1200 sek.

5. Beregn avgitt energi til fordamperen (kald side) (Q_K). Det gjøres slik:

Spesifikk varmekapasitet $c_0 = 4.2 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{grad})$

$$Q_K = c_0 \cdot m_k \cdot \Delta t_k = \underline{273\ 000 \text{ J}}$$

6. Beregn mottatt energi fra kondensatoren (varm side) (Q_V):

$$Q_V = c_0 \cdot m_v \cdot \Delta t_v = \underline{344\ 850 \text{ J}}$$

7. Levert energi til kompressoren (E_e):

$$E_e = P_e \cdot \Delta T = \underline{168\ 000 \text{ J}}$$

8. Ideelt skulle vi ha fått tilført varmemengde på varmsiden (Q'_V):

$$Q'_V = Q_K + E_e = 273\ 000 \text{ J} + 168\ 000 \text{ J} = \underline{441\ 000 \text{ J}}$$

Vi regner da ikke med at det også har lekket varme fra omgivelsene og inn i kaldtanken.

Finn avviket mellom Q'_V og Q_V . Drøft årsakene til avviket.

Avviket skyldes varmelekkasje i systemet. Noe av den tilførte elektriske effekten brukes til å varme opp kompressoren, noe av den transporterte varmen lekker ut gjennom rørsystemet før den når beholderen på varmsiden, og noe lekker også ut gjennom veggene og lokket på termosen. Videre vil det lekke varme fra omgivelsene til kaldsiden. Det medfører at temperaturen på kaldsiden blir noe høyere enn forventet.

9. Vi kan nå beregne varmefaktoren til pumpa som forholdet mellom mottatt energi på varmsiden og tilført elektrisk energi:

$$V_F = \frac{\text{Mottatt energi}}{\text{Tilført energi}} = \frac{344\ 850}{168\ 000} = \underline{2,05} \quad (2.21)$$



Drøfting

Hva er energigevinsten?

En varmefaktor på 2,05 betyr at om vi tilfører 1 kWh elektrisk energi, så mottar vi 2,05 kWh ut av kondensatoren (på varmsiden). Det er relativt beskjedent.

Hvor kommer overskuddet av energi fra?

Den leverte energien kommer dels fra den elektriske energien tilført kompressoren idet arbeidsmediet trykkes sammen (komprimeres). Den viktigste delen kommer imidlertid fra vårt energireservoar som i vårt eksperiment er vannkaret med 4,5 liter vann. Vi registrerer at vannet i beholderen blir sterkt avkjølt, det vil si det avgir varme.

Drøft feilkilder

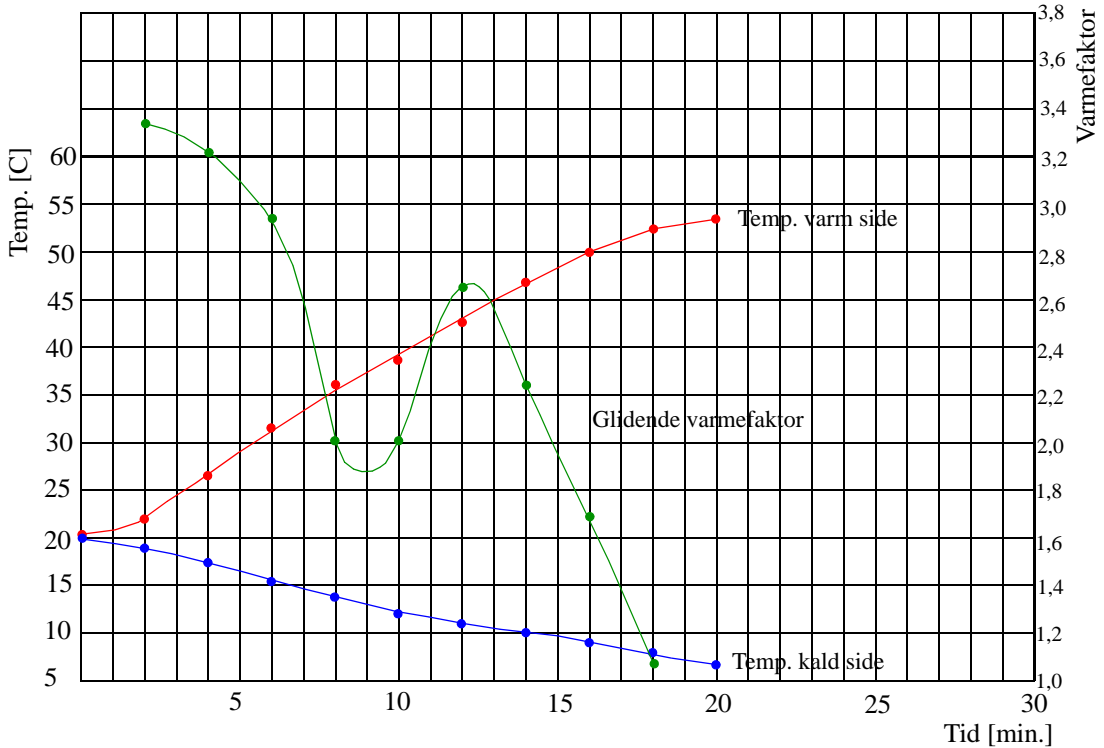
De viktigste kildene til feil, er varmelekkasje ut av beholderen på varmsiden, og inn i beholderen på kaldsiden. I tillegg har vi varmelekkasje ut og inn av rørsystemet mellom de to beholderne. Målefeil oppstår primært ved dårlig omrøring, slik at det oppstår temperaturforskjeller mellom topp og bunn i de to beholderne.

Vi har i dette eksempelet gjort målinger over relativt lang tid. Vi skal nå beregne hvordan varmefaktoren endrer seg underveis. Vi utfører beregningene i et løpende vindu på 4 minutter.

Tid fra start	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Temp. varm side	20,5 °C	22,2 °C	27 °C	32 °C	36,2 °C	38,5 °C	42,7 °C	47 °C	50 °C	52,5 °C	53,5 °C
Temp. kald side	20 °C	19 °C	17,5 °C	15,5 °C	14 °C	12 °C	11 °C	10 °C	9 °C	8 °C	7 °C
Elektrisk effekt	121 W	128 W	134 W	138 W	141 W	141 W	141 W	141 W	143 W	143 W	143 W
Glidende varmefaktor	6,5 °C -128 W -3,34		6,5 °C -140 W -2,03			7,3 °C -141,5 W -2,25					
		9,8 °C -133 W -3,22		6,5 °C -141 W -2,02		5,5 °C -142 W -1,69					
			9,2 °C -137 W -2,94		8,5 °C -141 W -2,64		3,5 °C -143 W -1,07				



Varmefaktoren er mest effektiv i starten når temperaturdifferansen er minst. Så faller varmfaktoren noe før den igjen stiger etter ca. 12 minutter. Det skyldes sannsynligvis at trykket i systemet begynner å stabilisere seg på et passende høyt nivå.



Ønsker vi å måle en høyest mulig varmfaktor, vil det derfor være lurt å la pumpa arbeide mot luft/luft de første 10 minuttene til trykket har stabilisert seg, for deretter å la den arbeide mot vann/vann. Deretter gjør vi målinger i et relativt kort tidsintervall, for eksempel 5 – 6 minutter, mens temperaturdifferansen er relativt lav.



Oppkjøring av varmepumpa før måling

Siden det tar en stund før trykkforskjellen bygger seg opp i pumpa, vil det være interessant å se om pumpas varmfaktor kan økes dersom vi lar pumpa arbeide med luft/luft en stund før vannbeholderne monteres. Vi lot derfor pumpa gå ca. 10 min. i luft-luft før vi monterte vannbeholderne. Betingelsene var ellers omtrent som foran. Resultatet ble som vist i tabellen under:

Tid fra start	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Temp. varm side	-	-	-	-	-	21 °C	23,5 °C	27 °C	32 °C	36 °C	38 °C
Temp. kald side	-	-	-	-	-	19 °C	17 °C	15 °C	14 °C	12 °C	10 °C
Elektrisk effekt	100 W	110 W	110 W	110 W	100 W	100 W	120 W	125 W	130 W	130 W	130 W
Trykk varm side	4 bar	10,8 bar	13,8 bar	14,6 bar	15,2 bar	16 bar	8 bar	bar	10,2 bar	11,2 bar	12,0 bar
Trykk kald side	3,9 bar	1,6 bar	1,2 bar	0,8 bar	0,65 bar	0,5 bar	1,4 bar	bar	2,0 bar	1,8 bar	1,7 bar

Av tabellen ser vi at trykkforskjellen bygger seg opp (16 – 0,5 bar) og fortsatt er stigende når vi setter inn beholderne med vann. Tilført elektrisk effekt var svært ustabil og varierte mellom 100 – 120 W da pumpa arbeidet med luft-luft. Da vannbeholderne ble montert, økte effektforbruket noe.

Vi velger å beregne varmfaktoren i tidsperioden fra 12 til 18 minutter (360 sek) etter oppstart. Vi regner en tilført elektrisk effekt på i gjennomsnitt 128 W i denne perioden. Med en målt temperaturøkning på 12,5 °C gir dette en varmfaktor på **2,85**.

Når det gjelder den lille varmepumpa har en erfart at bruk av små begerglass (0,5 l) gir svært lav varmfaktor (ca. 1.1). Det anbefales enten å benytte et radiatorsystem som beskrevet av KPT:

http://kptnaturfag.no/filbibliotek/Kataloger/Brosjyrer/fysikk/Varmepumpe_28260, eller anvende større kar både på varm og kald side. Bruk gjerne 2 - 2,5 liter.

3 Solfanger-laboratorium

Dette laboratoriet inneholder tre deler. I første del skal vi beskrive et par innledende forsøk som krever minimalt med utstyr. I del 2 skal effektiviteten til en



solfangere med tilhørende varmeveksler måles. I del 3 skal det gjøres kvalitative målinger på to enkle solfangere, én parabolisk og én laget av papp, for å få et inntrykk av solfangerens evne til å varme opp vann eller et lukket rom.

3.1 Innledende forsøk, oppvarming av flasker med ulik farge

De fleste er kjent med at svarte gjenstander blir varmere enn gjenstander i lyse farger. Dette er spesielt kjent fra biler uten luftkondisjoneringsanlegg. I de to innledende forsøkene knyttet til solfangere, skal vi se hvor mye dette egentlig betyr.

3.1.1 Måleprosedyre

Måling med luft i flaskene

Utstyr:

- Tre 1/2 liter brusflasker, malt i ulike farger
- Tre termometere
- Litt bomull
- Ei bygglampe (500 W)

Gjør følgende:

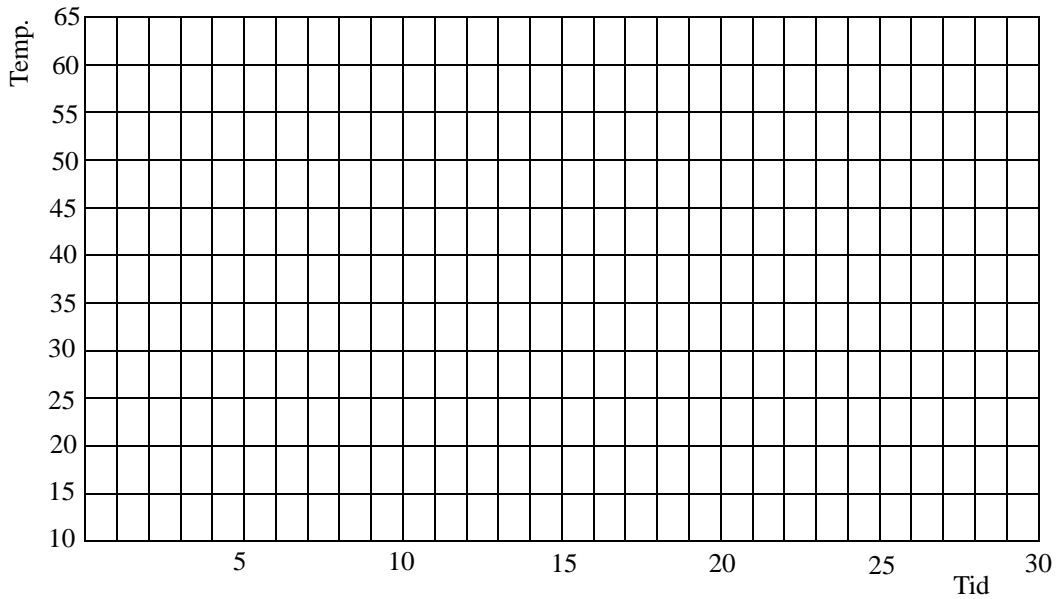
1. Sett lampa ca. 30 cm fra flaskene.
2. Stikk termometrene ned i flaskene slik at målesøylen er synlig over kanten ved start av forsøket. Fest dem med litt bomull i tuten.
3. Les av temperaturen ved forsøkets start.
4. Slå på lyset og les av temperaturen med 1 minutt mellomrom, og før resultatene inn i tabellen under.





Tid [min.]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

5. Framstill forløpene grafisk.



6. Drøft feilkilder.



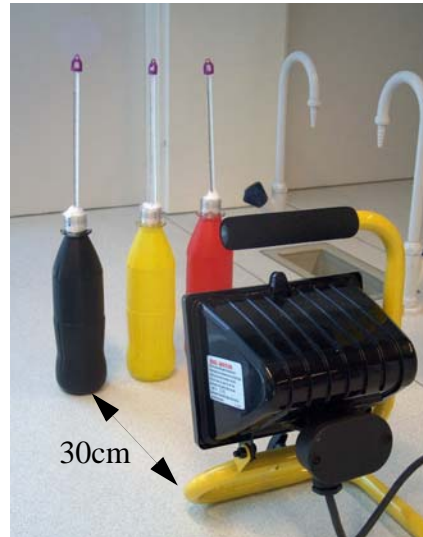
Måling med vann i flaskene

Utstyr:

- Tre 1/2 liter brusflasker, malt i ulike farger
- Tre termometere
- Litt bomull
- Ei bygglampe (500 W)

Gjør følgende:

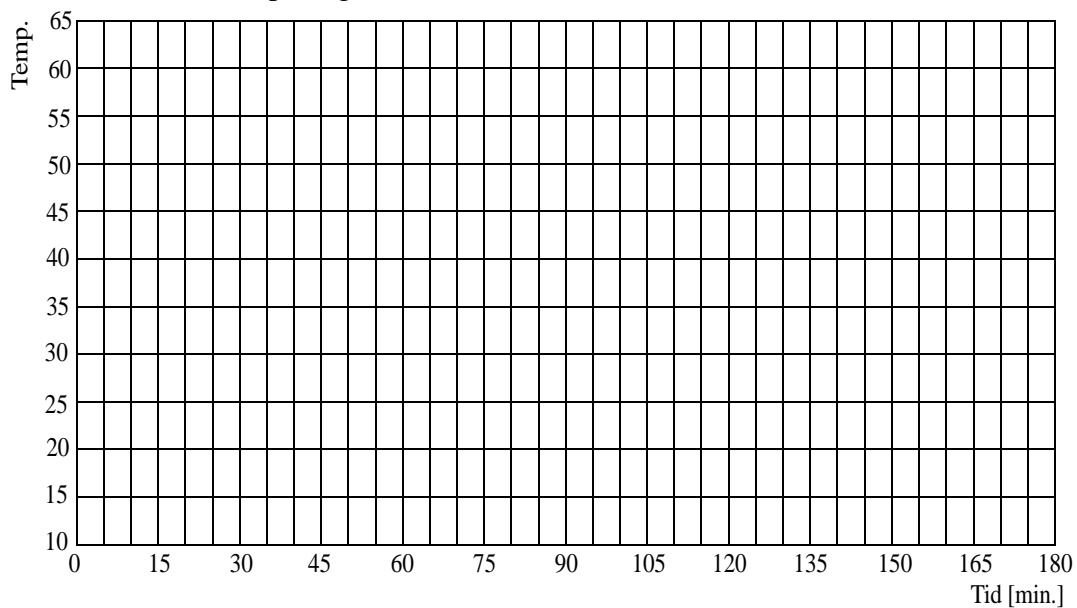
1. Fyll flaskene med vann fra springen.
2. Sett lampen ca. 30 cm fra flaskene.
3. Stikk termometrene ned i flaskene slik at målesøylen er synlig over kanten ved start av forsøket. Fest dem med litt bomull i tuten.
4. Les av temperaturen ved forsøkets start.
5. Slå på lyset og les av temperaturen med 15 minutters mellomrom, og før resultatene inn i tabellen under. Ryst flaskene mellom hver måling.



Tid [min.]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180



6. Framstill forløpene grafisk.



7. Sammenlign resultatet med målinger med luft.

Ser du noen forskjeller mellom de to måleseriene? Kan du forklare forskjellene?



3.1.2 Oppvarming av flasker med ulik farge, måleeksempler

Måling med luft i flaskene

Forsøket ble satt opp som beskrevet i avsnitt 3.1.1.

Vi valgte fargene sort, gul og rød. Videre valgte vi å sette flaskene side om side ca. 30 cm fra glasset på bygglampa.

En slik løsning vil gi en feilkilde ved at lysintensiteten på flaska i midten blir noe høyere enn på de to på hver side. En mer nøyaktig løsning vil være å gjøre målinger med én og én flaske plassert på samme sted.



Før målingene hadde termometrene stått i flaskene i mange timer, slik at de skulle ha samme temperatur.

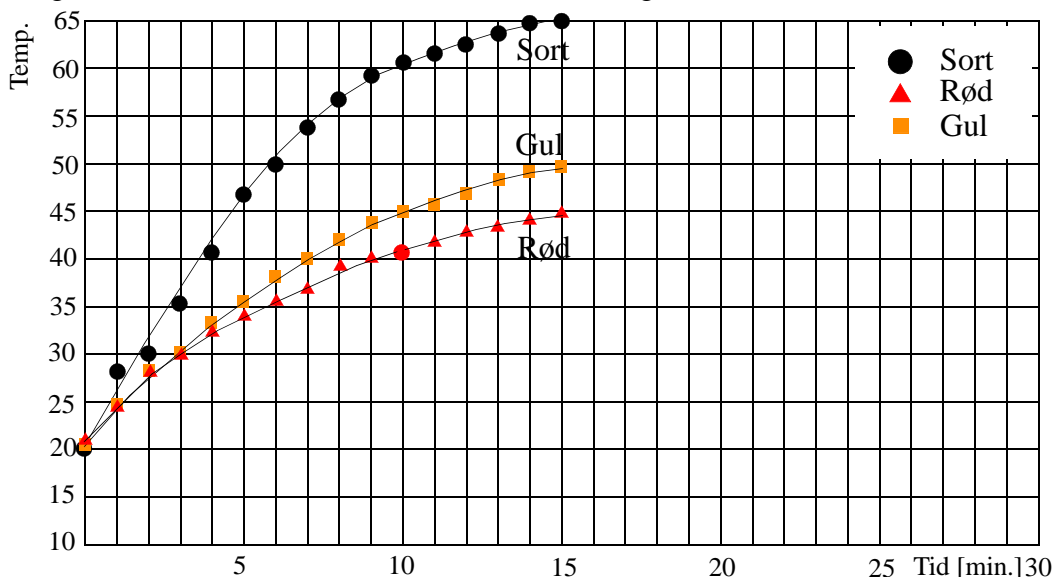
Likevel ser vi at temperaturen er litt ulik for de tre flaskene. Vi antar at dette skyldes unøyaktighet i termometrene.

Tabellen under viser måleserien.

Tid [min.]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sort [°C]	20,0	28	30	35,5	41	47	50	54	57	59,5	61	62	63	64	65	65
Gul [°C]	20,5	24,5	28	30,5	33	36	38	40	42	44	45	46	47	48	49	49,5
Rød [°C]	21,5	24,5	28	30	32	34	35,5	37	39	40	41	42	43	43,5	44	45



Figuren under viser de tre måleseriene framstilt grafisk.



Vi ser at det er betydelig forskjell på temperaturstigningen hos den sorte sammenlignet med den røde og den gule. Umiddelbart skulle en tro at den røde ble varmere enn den gule siden fargen er mørkere, men slik ser det ikke ut til å være. En feilkilde kan være at den røde sto til høyre for midten, mens den gule sto i midten. dermed kan de tre ha blitt belyst litt forskjellig.

Måling med vann i flaskene

Forsøket ble satt opp som beskrevet i avsnitt 3.1.1.

Vi valgte fargene sort, gul og rød. Videre valgte vi å sette flaskene side om side ca. 30 cm fra glasset på bygglympa med de ytterste flaskene ca 1 cm. nærmere lampa enn den gule i midten.

En slik løsning vil gi samme feilkilde som beskrevet foran.



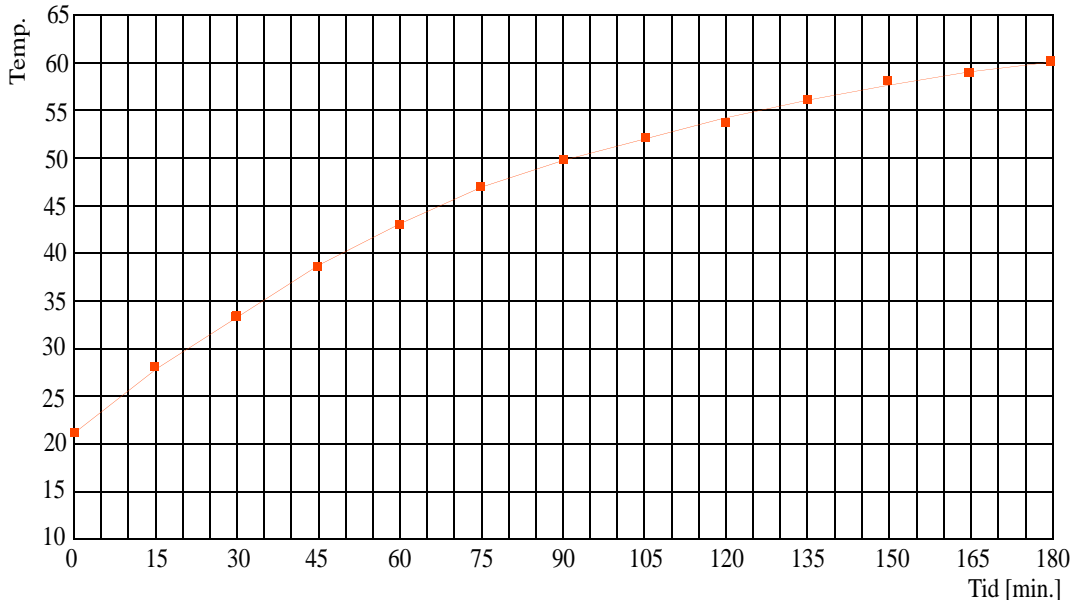


Før målingene hadde termometerne stått i flaskene i mange timer, slik at de skulle ha samme temperatur. Likevel ser vi at temperaturen er litt ulik for de tre flaskene. Vi antar at dette skyldes unøyaktighet i termometerne.

Tabellen under viser måleserien.

Tid [min.]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Rød [°C]	21	27,5	30	38	42,5	46	49	51,5	54	55,5	57,2	58	59,2
Gul [°C]	21,5	28	33,5	39	43	47	50	52	54	56	58	59	60
Sort [°C]	20	27,5	33	39	43	47	49,5	52	54,5	56	57,5	58,5	59,5

Figuren under viser de tre måleseriene framstilt grafisk.



Vi observerer følgende:

- Innen måleintervallet på 180 minutter er det liten forskjell på opptaket av varme for de tre flaskene til tross for at de har ulik farge (rød, gul og sort). Vi har derfor tillatt oss bare å plote temperaturen i den gule flasken.



At det ikke er større forskjell er litt underlig siden vi registrerte at temperaturen i den sorte flasken steg vesentlig fortere enn de to andre da de var fylt med luft.

- Temperaturstigningen er omtrent lineær (svakt buet) opp til 60 min. Mellom 60 og 90 min. endres helningen, før den igjen fortsetter å stige nær lineært opp til 150 min. Dette gjelder alle tre flaskene.

At en helning endrer seg på denne måten, skyldes som oftest at to effekter virker sammen. Når knekkpunktet skifter de på å dominere totalprosessen. Hvilke to fenomener vi her har med å gjøre er noe uklart, men en rimelig antagelse er at de skyldes samvirke mellom absorpsjon og utstråling av varme:

1. Absorpsjon av varme fra lyskilden (medfører temperaturøkning)
2. Utstråling av varme fra flaskene (medfører temperaturreduksjon)

De to fenomenene virker motsatt av hverandre. I starten, når forskjellen mellom vanntemperatur og romtemperaturen er lav, vil absorpsjonen være den mest dominerende effekten. Dermed vil temperaturen stige raskere. Etter hvert som temperaturforskjellen øker, vil utstrålingen gradvis øke og etter hvert bli mer og mer dominerende. Dermed vil temperaturstigningen avta. Dersom vi har latt forsøket gå lenge nok, ville disse to prosessene bli like store og temperaturen ville ha stabilisert seg, som vi også ser en antydning til.

Forsøk å finn ut hvorfor det ikke er større forskjell på temperaturendringene for de tre flaskene siden de har så ulik farge?

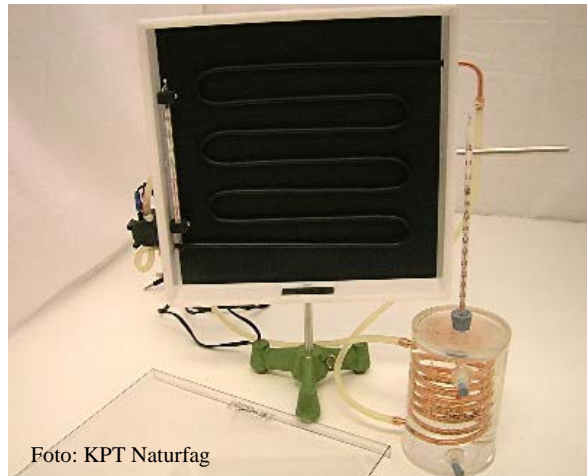


3.2 Solfanger for vannbåren varme

3.2.1 Måleoppsett og prosedyre

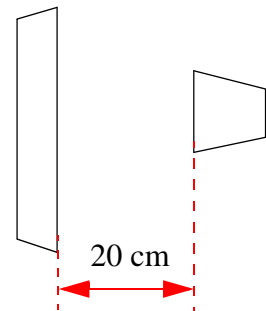
Utstyr

- En solfanger med rørsløyfe og termometer (ev. fra KPT Naturfag)
- En varmeveksler (radiator) med termometer
- Vannpumpe
- Strømforsyning
- Lyskilde (500 W)
- Lysintensitetsmåler



Framgangsmåte

1. Sett lampa ca. 20 cm fra solfangeren.
2. Mål temperaturen i solfangeren ved start ved hjelp av termometeret på innsiden av solfangeren (noter i tabell).
3. Mål temperaturen i radiatoren før start (noter i tabell).
4. Koble pumpa til strømforsyningen og slå på strømmen.
5. Still inn spenningen på 3,5 V.
6. Tenn lyset ved å sette i kontakten.
7. Mål lysintensiteten i W/m^2 ved hjelp av lysmåleren.
Lysintensitet (Φ_l): _____ W/m^2
8. Start klokka.
9. Les av temperaturen i solfangeren og i radiatoren hvert andre minutt og noter i tabellen.





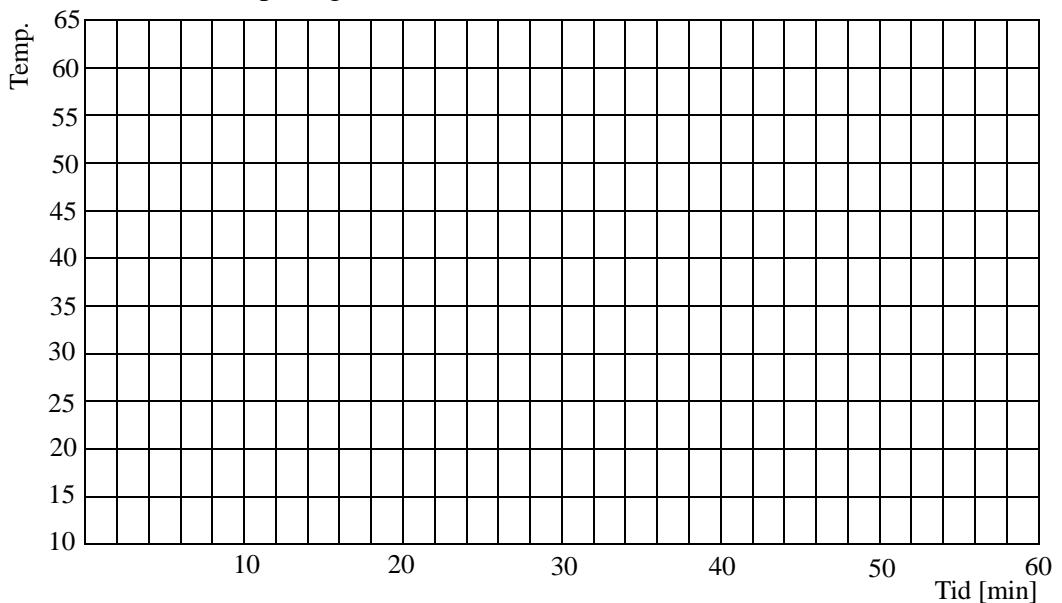
10. Mål og beregn det effektive solfangerarealet (bruk linjal).

Solfangerens areal (A_f): _____ m^2 .

Tid [min.]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Solfanger																
Radiator																
Tid [min.]	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62
Solfanger																
Radiator																

11. Registrer den totale tida (T) belysningen har pågått: _____ sek.

12. Framstill forløpene grafisk.



Skiv en enkel tolkning av grafene:



Beregn tilført lysenergi

Tilført lysenergi = Lysintensitet [W/m^2] (Φ_l) · effektivt areal [m^2] (A_l) · tid [sek] (T)

$$Q_l = \Phi_l \cdot A_l \cdot T \quad (3.1)$$

$$Q_l = \text{_____} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{_____} \text{ m}^2 \cdot \text{_____} \text{ sek} = \text{_____} \text{ J} = \text{_____} \text{ kJ}$$

Beregn tilført varme til radiator (varmeveksler)

Vi vet at spesifikk varmekapasitet for vann er $c_0 = 4.18 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$. Varmen som skal til for å varme opp vannmengden m_v [kg] fra temperaturen t_1 til t_2 [K] er lik Q_v [kJ].

Vi må dermed beregne (eller måle) massen av vannet i varmeveksleren. Det kan vi gjøre ved å måle diameteren og beregne volumet. Trekk fra litt for volumet av kobberrøret. Vi kan også måle vannmengden ved hjelp av et desilitermål. Deretter regner vi om vannvolumet til masse.

$$m_v = \text{_____} \text{ kg} \quad (3.2)$$

Beregn tilført energi til radiatoren:

$$Q_v = c_0 \cdot m_v \cdot (t_2 - t_1) = \text{_____} \text{ kJ} \quad (3.3)$$

Vi kan nå sette opp et energibudsjett, hvor vi antar at en vesentlig del av varmen som tilføres solfangeren, vil gå til spille i apparaturen. Vi kaller varmelekkasjen for Q_a :

Vi kan sette opp:

Energi medgått for oppvarming av vann i varmeveksler =
Tilført energi fra lyskilde – Lekkasje av energi i apparatur



Eller:

$$Q_v = Q_l - Q_a \quad (3.4)$$

Vi kan definere effektiviteten som forholdet mellom *varme medgått for oppvarming av vann i varmeveksler* og *varme tilført fra lyskilden*.

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_l} \quad (3.5)$$

Solfangerens effektivitet er målt til $\eta =$ _____

Drøft følgende:

Hva kan gjøres for å øke effektiviteten til solfangeren og varmeveksleren (radiatoren)?

Ved å utelate tilført effekt fra den elektriske pumpa har vi gjort en feil med hensyn til systemets totale virkningsgrad. Vi skal derfor også ta med denne. Energi tilført systemet via den elektriske pumpa er:

$$Q_p = I_p \cdot V_p \cdot T \quad (3.6)$$

Mål strøm og spenning for den elektriske vannpumpa ved hjelp av et multimeter:

Strømmen (I_p) = _____ Ampere

Spenning (V_p) = _____ Volt

Beregn tilført energi til vannpumpa i måleperioden:

$$Q_p = \text{_____ [A]} \cdot \text{_____ [V]} \cdot \text{_____ [sek]} = \text{_____ J} = \text{_____ kJ}$$



Beregn den modifiserte virkningsgraden η' :

$$\eta' = \frac{Q_v}{Q_l + Q_p} = \frac{\quad}{\quad} = \frac{\quad}{\quad} \quad (3.7)$$

Virkningsgraden inkludert energi tilført systemet gjennom vannpumpa blir: _____

3.2.2 Solfanger med vannbåren varme, et måleeksempel

Målt lysintensitet (Φ_l): 725 W/m²

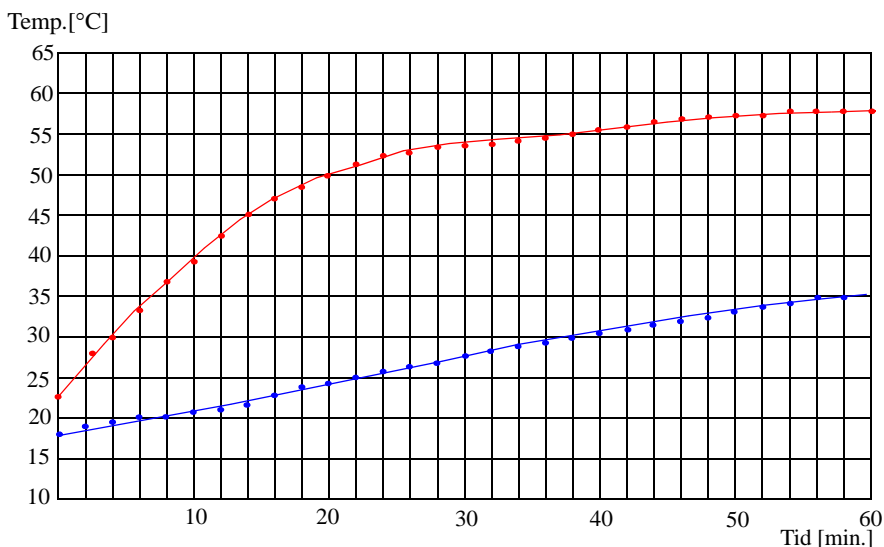
Avlest temperatur:

Tid [min.]	0	2,5	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Solfanger [°C]	22,5	28	30	33,5	36,5	39,5	42,5	45	47	48,5	50	51	52	52,5	53	53,5
Varveksler [°C]	18	19	19,5	20	20	21	21,5	22	23	24	24,5	25	26	26,5	27	28
Tid [min.]	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62
Solfanger [°C]	53,5	54	54,5	55	55,5	56	56,3	57	57	57,5	57,5	58	58	58	58	
Varveksler [°C]	28,5	29	29,5	30	30,5	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34	34,5	35	35	

Registrert tid (T) belysningen har pågått: 3600 sek



Forløpet framstilt grafisk.



Enkel tolkning av grafene:

Vi ser av grafene at temperaturen i solfangeren stiger relativt raskt for så å flate ut rundt 55 °C etter ca. 30 min. Radiatoren har et betydelig etterslep og stiger temmelig lineært til den kommer opp til 35 °C.

Beregn tilført lysenergi:

Målt solfangerareal til $0,3 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} = \underline{0,09 \text{ m}^2}$.

$$Q_I = 725 \text{ W/m}^2 \cdot 0,09 \text{ m}^2 \cdot 3600 \text{ sek} = 234\,900 \text{ J} = \underline{234,900 \text{ kJ}}$$

Beregnet tilført energi til varmeveksler (radiator):

Målt vannmengden til:

$$m_v = \underline{0,8 \text{ kg}}$$

Beregnet tilført energi til radiatoren:

$$Q_v = c_0 \cdot m_v \cdot (t_2 - t_1) = 4,18 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]} \cdot 0,8 \text{ [kg]} \cdot (35 - 18) \text{ [K]} = \underline{57 \text{ kJ}}$$



Beregnet virkningsgrad lik:

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_l} = \frac{57 \text{ kJ}}{235 \text{ kJ}} = \underline{0,242} \quad (3.8)$$

Solfangerens effektivitet er målt til $\eta = \underline{0,242}$ (eller **24,2 %**)

Hva kan gjøres for å øke effektiviteten til solfangeren og radiatoren?

Effektiviteten kan bedres ved å gjøre solfangeren større, legge rørene tettere, optimalisere hastigheten på vannet, og isolere transportrørene. Dersom vi ønsker å varme opp vann i en beholder (varmeveksleren), vil det være hensiktsmessig å isolere varmeveksleren. Dersom den skal varme opp et rom, vil den fungere som en varmeveksler mellom vannet og rommet omkring. Vannet i beholderen vil gjøre at systemet blir langsommere. Er man interessert i en varmekilde med raske respons, kan rørene brukes direkte for oppvarming.

Vi inkluderer energi tilført systemet via vannpumpa. Vi måler:

Strømmen (I_p) = 0,65 Ampere

Spenning (V_p) = 3,5 Volt

$Q_p = 0,65 \text{ [A]} \cdot 3,5 \text{ [V]} \cdot 3600 \text{ [sek]} = 8190 \text{ J} = \underline{8,2} \text{ kJ}$

Vi kan da beregne en modifisert virkningsgrad η' :

$$\eta' = \frac{Q_v}{Q_l + Q_p} = \frac{57 \text{ kJ}}{(235 + 8,2) \text{ kJ}} = \underline{0,234} \text{ (eller 23,4 \%)} \quad (3.9)$$

Virkningsgraden inkludert energi tilført systemet via vannpumpa blir da 0,234, det vil si et fall på bare **0,008** eller bare **0,8** prosentpoeng, som er relativt beskjedent.



3.3 Solfanger med parabol

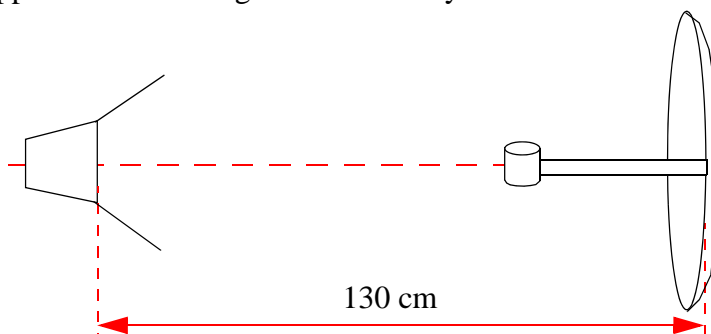
3.3.1 Måleoppsett og prosedyre

Utstyr

- Parabol med lite beger (ev. fra KPT Naturfag)
- Termometer (0 – 100 °C)
- Lyskilde (800 W)
- Målesylinder (50 ml)
- Klokke

Framgangsmåte

1. Plasser lampa slik at lyset fokuseres på begeret (avstand ca. 130 cm).
2. Mål opp 10 ml vann i begeret med målesylinderen.

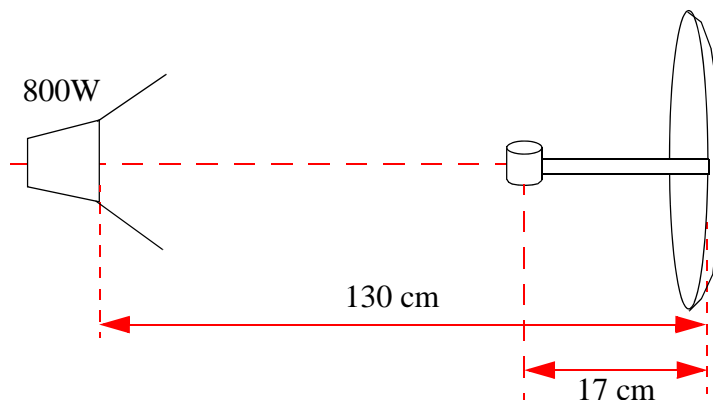


3. Mål temperaturen i begeret før start.
4. Slå på lyset.



3.3.2 Solfanger med parabol, et måleeksempel

Figuren under viser måleoppstillingen:



Parabolen plasseres slik at den fokuserer mest mulig på beholderen. Prøving viser at dette inntreffer i en avstand på ca. 130 cm fra lampen med den valgte parabolen. Siden vi i dette tilfellet bruker ferdig levert utstyr, er det rimelig å anta at begeret er plassert i brennpunktet til parabolspielet, det vil si det ideelle ville ha vært å rette parabolen mot en kilde uendelig langt borte, for eksempel sola. Lysintensiteten ved ca. 130 cm er målt til 70 W/m^2 .

Målingene er utført på følgende måte:

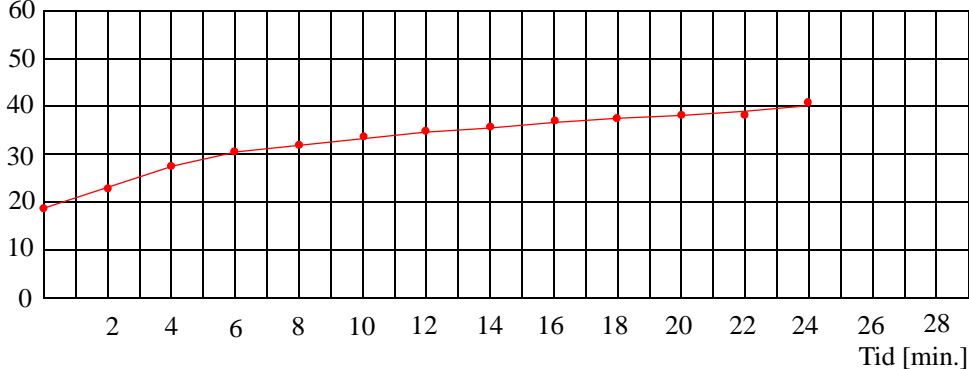
1. Termometeret forvarmes i hånda til omtrent riktig temperatur.
2. Termometeret stikkes ned i begeret 20 sekunder før temperaturen skal avleses, og hele kula nederst på termometeret under vann.
3. Målingene avleses hvert andre minutt.

Tid [min.]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Temp. i beger [°C]	19	22,5	28	30,5	32	33,5	35,5	36,5	37,5	38,5	39	39	40,5



4. Grafisk framstilling av forløpet.

Temp. [°C]



Drøfting:

Kurven stiger raskt i begynnelsen for så å stige langsommere og langsommere etter hvert. Etter som temperaturen på begeret blir høyere, vil også lekkasjen til omgivelsene øke. Når tilførselen av varme og lekkasjen til omgivelsene er like store, vil temperaturen stabilisere seg. Det punktet er ikke nådd innen måleperioden. At kurven ser ut til å ha en knekk ved ca. 6 min., kan skyldes unøyaktigheter i målingen, men det kan også skyldes at før knekktemperaturen er det to effekter som virker. Både den som skyldes direkte oppvarming fra lyskilden, og den som skyldes refleksjon fra speilet. Før knekkpunktet kan vi ikke se bort fra direktestråling. Etter knekkpunktet er dette bidraget neglisjerbart. Dette er imidlertid en hypotese som ikke er utprøvd. En lignende knekk er også registrert ved en tidligere måleserie, da ved ca. 34 °C.



3.4 Solfanger i papp

3.4.1 Måleoppsett og prosedyre

Utstyr

- Solfanger i papp (ev. fra KPT Naturfag)
- Termometer
- Lyskilde (500W)
- Klokke



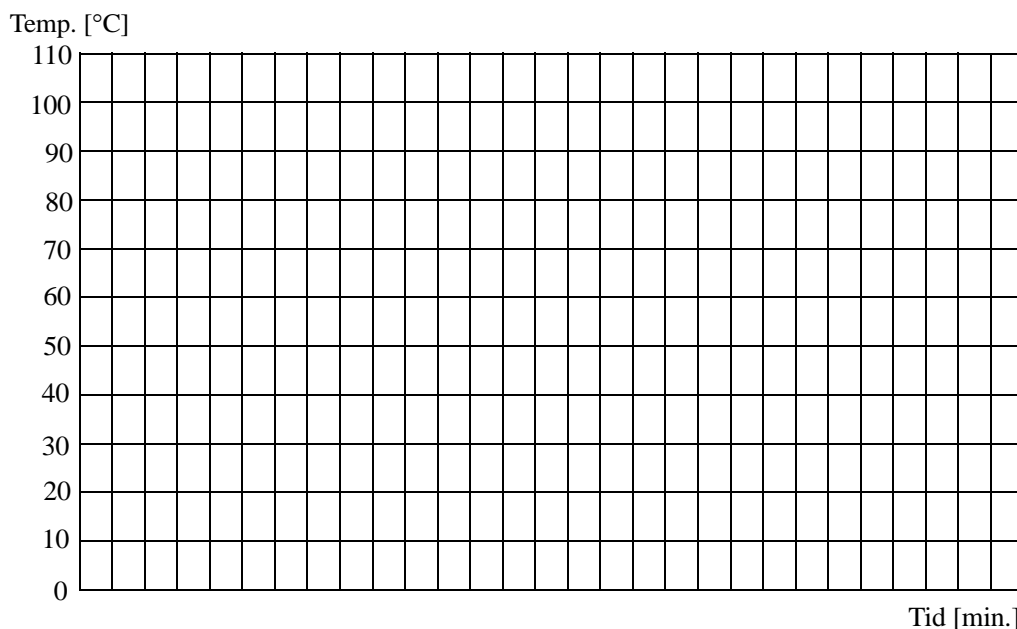
Framgangsmåte

1. Plasser lampen ca. 50 cm foran solfangeren.
2. Sørg for at lampen og solfangeren peker mot hverandre (det vil si er plassert langs en felles akse).
3. Mål temperaturen inne i solfangeren før start.
4. Slå på lyset.
5. Mål temperaturen i solfangeren hvert andre minutt og noter resultatet i tabellen.

Tid [min.]	0																		
Temp. i solfanger [°C]																			
Tid [min.]																			
Temp. i solfanger [°C]																			



6. Framstill forløpet grafisk.



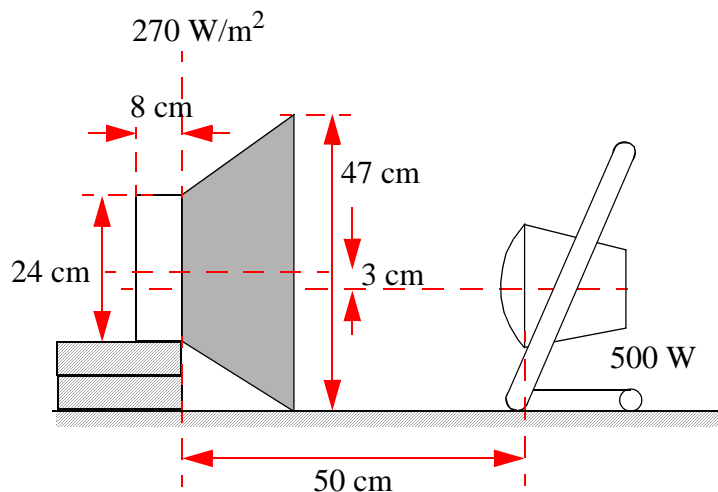
Tolk grafen:

Foreslå en utvidelse av oppgaven for bruk i undervisningen:



3.4.2 Solfanger i papp, et måleeksempel

Figuren under viser måleoppstillingen:

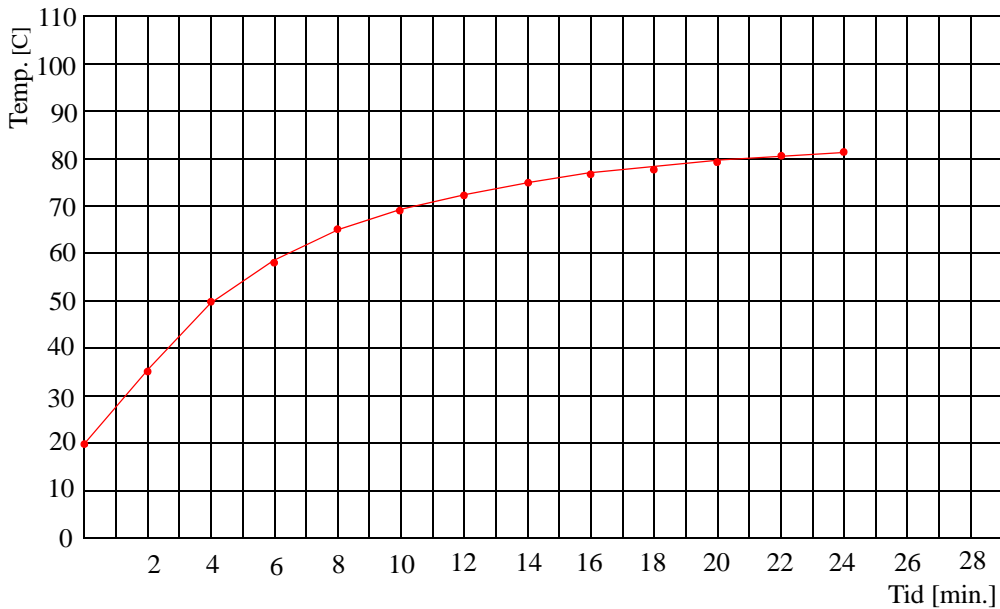


Solfangeren er plassert 50 cm foran glasset i lyskasteren, som er utstyrt med en 500 W lyspære. Aksen til lyskasteren avviker med ca. 3 cm for aksen til solfangeren. Solfangeren består av “en låvedøråpning” på 47 · 47 cm. “Dørene” er dekket med reflekterende materiale. Innerst består den av en kvadratisk boks med en bunnplate på 24 · 24 cm og en dybde på 8 cm. Fransiden av boksen er dekket med en transparent plastfolie. Lysintensiteten ved boksens framside er målt til 270 W/m².

Tid [min.]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Temp. i solfanger [°C]	20	35,5	50	58,5	65	69,5	72	75	77	78	79,5	80,5	81



7. Grafisk framstilling av forløpet.



Drøfting

Grafen stiger kraftig i starten før den flater ut. Den har ikke nådd sitt maksimumsnivå innen måleperioden på 24 minutter. For øvrig byr ikke kurven på særlig mange overraskelser. Ved sterkt sollys forventes en lysintensitet på nærmere 1000 W/m^2 hvilket sannsynligvis vil gi en langt høyere temperatur (nærmere $150 \text{ }^\circ\text{C}$).

4 Referanser

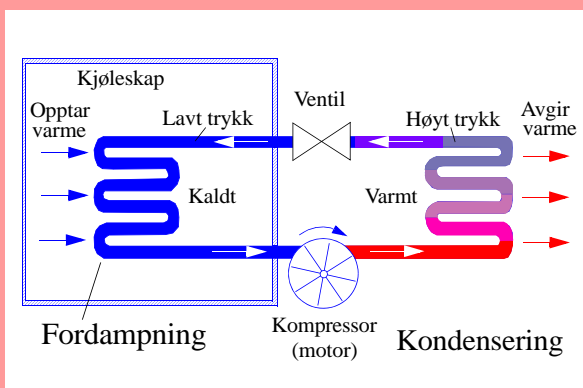
- [1] Einar Oterholm, *Varmepumper*, Einar Forlag 2003
einar@oterholm.no
- [2] Sverre Bruun, Olav Devik, *Fysikk for gymnasiet – Varme*,
Olaf Norlis Forlag 1969.
- [3] Jørn Stene, Sintef, <http://www.energy.sintef.no/prosjekt/Annex29/>
- [4] KPT naturfag, bruksanvisning: 28311



-
- [5] Metningstrykk
http://folk.uio.no/jegill/for111-02/GF111_Kap4.htm
- [6] Jørn Stene, *Varmepumper – Grunnleggende varmepumpeteknikk*
SINTEF Energiforskning AS, Avd. Energiprosesser, utg. 4, 1997
Rapportnr. STF84 A97302







Målet med heftet er at det skal være en støtte til elevverkstedet om varmepumper og kjøleskap, samt lærerkurs over samme tema. Heftet er primært ment som en lærerveiledning, men deler kan brukes som elevark under laboratorieøvelsene. Heftet inneholder en prinsipiell beskrivelse av varmepumpas virkemåte og oppbygning, supplert med forslag til eksperimenter for å vise hvordan den fungerer. For å vise at damp inneholder vesentlig mer termisk energi enn varmt vann med samme temperatur, beskrives et forsøk for å måle spesifikkvarmekapasitet til vandedamp. Dessuten beskrives måling av varmefaktoren til en laboratorie-varmepumpe.

Heftet inkluderer også øvelser knyttet til solfangere levert av KPT Naturfag. Her kommer teorien knyttet til spesifikk varmekapasitet godt med.

Heftet er ikke ment å være utfyllende om emnet.

Nils Kr. Rossing
Universitetslektor ved Skolelaboratoriet og prosjektleder ved Vitensenteret
E-post: nils.rossing@plu.ntnu.no

Tore Fagerli
Lektor ved Byåsen videregående skole
E-post: tore.fagerli@stfk.no

Skolelaboratoriet har som oppgave å drive forsknings- og utviklingsarbeid rettet mot undervisning i realfag og teknologi i skolen. Gjennom SLserien vil PLU og Skolelaboratoriet publisere resultatene av dette arbeidet.



Program for lærerutdanning

Skolelaboratoriet
for matematikk, naturfag og teknologi

Tlf. 73 55 11 43
Faks 73 55 11 40
<http://www.skolelab.ntnu.no>