

**Mirko Nurminen**

**OPETUSLAITTEISTOJEN SUUNNITTELU ENERGIA TEKNIKAN  
LABORATORIOON**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus  
Toukokuu 2020**

**TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ**

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Toukokuu 2020	<b>Tekijä/tekijät</b> Mirko Nurminen
<b>Koulutusohjelma</b> Sähkö- ja automaatiotekniikka		
<b>Työn nimi</b> OPETUSLAITTEISTOJEN SUUNNITTELU ENERGIA TEKNIIKAN LABORATORIOON		
<b>Työn ohjaaja</b> Kari Saaranen	<b>Sivumäärä</b> 39	
<b>Työelämäohjaaja</b> Riku Niva		
<p>Opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia suunnitellun opetuslaitteistojen avulla kaasua korkeissa lämpötiloissa ja pohtia siitä mitattuja tuloksia käyttäen apuna integraalilaskentaa. Toteutustavaksi valittiin induktiolämmitin, joka lämmittää ilman tai jonkin muun kaasun pyörrevirtojen vaikutuksesta, joita se synnyttää.</p> <p>Edeltäviä valmisteluja olivat laskutoimituksia tarvittavien kaavojen etsiminen ja työvaiheiden suunnittelu. Viimeisessä vaiheessa laitteistot voidaan ottaa käyttöön, mutta työ oli mahdollista kuvata myös teoriassa. Työssä myös tutkittiin mitattuja arvoja ja tarkoituksena oli verrata oletettuja arvoja siihen, mitä saadaan laskemalla tutkittavan kaasun ominaislämpökapasiteetti mitatusta lämpötilasta. Turvallisuutta oli valvottava kaikissa työvaiheissa, varsinkin kaasun lämmitys- ja jäähdytysvaiheessa ja sen vuoksi työssä tutkittiin myös kaasun jäähdytysprosesseja.</p>		
<b>Asiasanat</b> ideaalikaasu, induktio, ominaislämpökapasiteetti, pyörrevirta		

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> May 2020	<b>Author</b> Mirko Nurminen
<b>Degree programme</b> Electrical and automation engineering		
<b>Name of thesis</b> PLANNING TEACHING DEVICES FOR THE ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY		
<b>Instructor</b> Kari Saaranen	<b>Pages</b> 39	
<b>Supervisor</b> Riku Niva		
<p>The purpose of the thesis was to study gas in high temperatures with the planned teaching devices and reflect measured results from it by using integral calculus. An induction heater was chosen for the execution method which heats the air or some other gas under the influence of eddy currents it generates.</p> <p>Preceding preparations were finding the needed formulas for the calculation and planning the work phases. In the last phase the devices can be put into practice, but the thesis's work was also possible to describe in theory. The measured values were also examined in the thesis and the objective was to compare default values to what calculating the examined gas's heat specific capacity gives instead from the measured temperature. Safety was to be supervised during each work phase, especially during the gas heating and cooling phase and therefore gas cooling processes were also examined in the thesis.</p>		
<b>Key words</b> eddy current, ideal gas, induction, specific heat capacity		

TIIVISTELMÄ  
ABSTRACT  
SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	1
2 LÄMPÖTILA.....	2
2.1 Lämmön siirtyminen .....	3
2.1.1 Säteily .....	3
2.1.2 Konvektio .....	3
2.1.3 Johtuminen.....	7
2.2 Lämmönsiirtimien arvoja .....	8
2.3 Ominaislämpökapasiteetti ja lämpökapasiteetti .....	8
3 KAASUN OMINAISUUDET JA YHTEYS LÄMPÖTILAAN.....	13
3.1 Kaasun lämpöliike.....	13
3.2 Lämmön siirtyminen kaasussa.....	14
3.3 Ideaalikaasu .....	15
3.4 Kaasun ominaislämpökapasiteetti .....	16
3.5 Ominaislämpökapasiteetin määrittäminen .....	19
3.6 Kaasun lämpöteho/lämpövirta.....	23
3.7 Kriittinen lämpötila.....	24
4 INDUKTIO.....	25
4.1 Itseinduktio.....	26
4.2 Faradayn ja Lenzin laki .....	27
4.3 Pyörrevirrat .....	28
5 INDUKTIOLÄMMITIN.....	29
5.1 Induktiolämmittimen osat.....	29
5.2 Induktiolämmittimen turvallinen käyttö.....	31
6 MITTAAMINEN .....	32
6.1 Mihin mittausta tarvitaan .....	32
6.2 Mittausmenetelmät.....	33
7 TURVALLISUUS .....	34
7.1 Jäähdytysprosesseja .....	34
7.2 Jäähdytystehon laskenta .....	35
8 POHDINTA.....	36
LÄHTEET .....	38
<b>KUVIOT</b>	
KUVIO 1. Ilman molaarisia ominaislämpökapasiteetteja.....	21
KUVIO 2. Typen molaarisia ominaislämpökapasiteetteja.....	21
KUVIO 3. Hapen molaarisia ominaislämpökapasiteetteja.....	22
KUVIO 4. Vedyn molaarisia ominaislämpökapasiteetteja .....	22

## **KUVAT**

KUVA 1. Virtausmittarin lähetin.....	4
KUVA 2. Virtaussensorin tyyppikilven arvoja .....	5
KUVA 3. Induktiolämmittimen osat.....	30

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Kaasujen polynomisovitteet vakiopaineessa (J/mol*K) .....	19
TAULUKKO 2. Eri kaasujen ominaislämpökapasiteetteja (J/mol*K).....	20
TAULUKKO 3. Ominaislämpökapasiteetin vertailu (J/mol*K).....	23

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä lämpötilan mittaamiselle opetuslaitteisto, josta saadaan mitaustuloksia ja analysoinnissa verrata näitä tuloksia integraalilaskennassa oletettuihin lukuihin liittyen kaasun ominaislämpökapasiteettiin. Työn perustana ja viitekehyksenä käytettiin muun muassa teoriaa lämpötilaa koskien termodynamiikasta, kaasun vakioita ja induktioilmiöön liittyen teoriaa sähköopista. Nämä kaikki aihealueet ovat osana sähköinsinöörin opintoja ja siksi tämä tutkimus tukee saatua koulutusta. Tavoitteena oli rakentaa laboratorioon opetuslaitteisto, jolla saataisiin toistuvia ja luotettavia tuloksia kohteen lämpötilasta.

Toimeksiantaja oli Centria-ammattikorkeakoulu ja työn käytännön osio oli tarkoitus tehdä energiatekniikan laboratoriossa. Tilan rakennus tutkimusta varten oli myös osana opetuslaitteiston suunnittelua ja se edellytti esimerkiksi palomestarilta hyväksyntää paloturvallisuudesta tilalle, jossa käsitellään korkeita lämpötiloja. Pääsin tutustumaan työmaalla jo ennen tilan valmisteluja ja kävin keskusteluja sen suunnittelusta, joka oli sisällyttänyt esimerkiksi materiaalin kulujen laskemisesta. Tutkimus pyrki kattamaan teorialukujensa avulla kaiken oleellisen työn tavoitteeseen pääsemisestä siltä varalta, jos laitteiden asentaminen jää vain suunnitteluvaiheeseen, eikä työtä pystyttäisi toteuttamaan käytännössä lainkaan. Integraalilaskennalla laadittiin vertailu työstä vaadittuihin ominaislämpökapasiteetilaskuihin, jotka osoittavat tutkimuksen hyödyllisyyttä ominaislämpökapasiteetin laskemista varten. Tuloksien taulukointi oli myös hyvää harjoittelua dokumentointia varten.

Sähköopintojen kannalta oli tärkeätä kertoa lukijalle luvuissa 4 ja 5 induktioilmiön ja pyörrevirtojen teoria, sillä kaasun lämmitys tehdään induktiolämmittimellä. Lukujen 2 ja 3 tarkoituksena oli tuoda esille kaikki tarpeellinen tieto integraalilaskentaa varten. Luvussa 2 käsitellään tutkimukseen liittyviä ilmiöitä, jotka vaikuttivat kaasun lämpötilan tutkimustuloksiin ja luku 3 kertoo tutkimuskohteen ominaisuuksista, eli siinä perehdytään kaasun ominaisuuksiin. Luvussa 6 kerrotaan mittaamisesta ja kalustosta, jolla mitausprosessi voidaan tehdä. Työ sisälsi luonteensa vuoksi terveyteen kohdistuvia riskejä johtuen korkeiden lämpötilojen käsittelystä, minkä vuoksi turvallisuuden varmistaminen oli tärkeätä ja turvallisuus luvussa 7 käydään siksi läpi myös eri mahdollisuuksia kaasun jäähdyttämiselle. Pohdinnassa vedetään yhteen tutkimusprosessin kulku ja arvioidaan opinnäytetyön tavoitteita ja niiden saavuttamista.

## 2 LÄMPÖTILA

Lämpötilaa koskevan tutkimuksen tarkoituksena oli lämmittää kaasua niin korkeaan lämpötilaan, että lineaarisen ominaislämpökapasiteetin riippuvuus lämpötilasta ei enää ole hyvä malli, ja arvioida ominaislämpökapasiteetti integrointilaskennan avulla ja soveltaa tätä mallia mittaushavainnoilla. Lämpötilaa koskevan teorian tunteminen on siksi oleellinen osa ominaislämpökapasiteetin laskemista. Lämpötila on suure, jonka tunnus on  $T(t)$  ja sen yksiköt ovat celsiusaste  $^{\circ}\text{C}$  ja kelvin  $\text{K}$ . Suurelle on myös olemassa fahrenheitaste  $^{\circ}\text{F}$ , jota käytetään lähinnä Yhdysvalloissa, joten sitä ei käytetä lainkaan tässä työssä. Absoluuttisen lämpötilan tunnus on myös  $T$ . Lämpötila on SI-järjestelmän suure ja järjestelmän yksikkö on kelvin, joka on yhtä suuri kuin celsiusaste ja sen huomaa kaavasta  $\Delta T/\text{K} = \Delta t/^{\circ}\text{C}$  ja sillä mitataan termodynaamista lämpötilaa.  $\Delta T$  tarkoittaa lämpötilan muutosta. Muunnoskaava tarvittaessa näiden kahden yksikön välillä on  $T/\text{K} = t/^{\circ}\text{C} + 273,15$  ja  $T$ :llä tarkoitetaan lämpötilaa kelvineissä ja  $t$ :llä lämpötilaa celsiusasteissa. Celsiusastetta käytetään tunnetusti celsiuslämpötila-arvoja varten. Celsiuslämpötila määritellään yhtälöllä  $t = T - T_0$ , jossa  $T_0$  on  $273,15 \text{ K}$ , joka on veden jäätymispiste eli celsiusasteina  $0^{\circ}\text{C}$ . (Hautala & Peltonen 2016, 157; Inkinen & Tuohi 2002, 353-354.)

Tutkimusprosessissa oleellinen ilmiö on lämmön siirtyminen. Lämpö on energian muoto, joka kalorimetrin määrittelyn mukaan lämpötilaerojen seurauksena aiheuttaa ympäristön ja kappaleen välillä energian siirtymistä näissä ja kappaleen molekyylien liikettä kutsutaan lämpöliikkeeksi. Mitä enemmän molekyylit lämpiävät, sen nopeammin ne liikkuvat ja värähtelevät. Lämpöenergiaa ei voida luoda tai hävittää, vaan se on tullut jostakin ja se muuttuu edelleen muodosta toiseen. (Paakkari 1997, 5.)

Paakkarin (1997, 5) teoksen mukaan toinen lämmöstä käytetty määritelmä kuvailee sen olevan eri kappaleiden olemista vuorovaikutuksessa keskenään, jolloin energiaa vaihtuu niissä keskenään niiden ollessa lämpökosketuksessa toisiinsa. Vuorovaikutuksessa keskenään olevien kappaleiden lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan ja vuorovaikutuksen aikana niiden tavoite on saavuttaa sama lämpötila ja se tapahtuu lämpimämmän kappaleen siirtämällä lämpöä kylmempään kappaleeseen. Kappaleiden välillä kulkee siirtymisessä lämpövirta ja kun sama lämpötila on saavutettu, kappaleissa vallitsee terminen tasapainotila, jota kutsutaan lämpötasapainoksi. Lämpöenergia ei itsestään siirry alemmasta lämpötilasta korkeampaan, koska siirtymiseen tarvitaan työtä. Lämpöä ja työtä voidaan mitata samoilla energiayksiköillä, joista yksi on (J) joule. (Lampinen 2013, 22; Paakkari 1997, 5.)

## 2.1 Lämmön siirtyminen

Prosessissa lämmitettävä kaasu saavuttaa korkean lämpötilan, kun siihen siirretään lämpöä säteilyllä. Kaasuun tuodaan siis lämpöä ulkoisesta lähteestä ja lämpö siirtyy kolmella eri tavalla, joita ovat johtuminen, konvektio tai säteily. Kaikkia näitä yhdistää se, että lämmönsiirto kappaleiden välillä perustuu niissä olevien lämpötilaerojen pyrkimykseen tasoittua, ja tätä käsitettä kutsutaan termiseksi tasapainoksi. Ennen termistä tasapainoa muutostilassa kappaleesta toiseen siirtyvällä lämmöllä tarkoitetaan lämpövirtaa ja se on siirtymätilassa olevan aineen sisäenergia. Kappale tai systeemi on lämpöeristetty eli adiabaattinen, kun se ei ole lämmönsiirtoyhteydessä ympäristönsä kanssa. Säteilyn lisäksi työssä käytettävä lämmönsiirtomekanismi on virtausmittarissa tapahtuva konvektio, joka saadaan aikaan paine-eron avulla. Säteilyn ja konvektion välityksellä tapahtuvat lämmönsiirrot eivät vaikuta toisiinsa, mutta molemmat voivat tapahtua samaan aikaan. Kummankin järjestelmän lämmönsiirtymiskerroin voidaan laskea yhteen silloin, kun kummallakin järjestelmällä on sama lämpötila, mutta tässä tutkimuksessa induktiolämmittimestä syntyvän säteilyn lämpötila oli siihen liian suuri. (Aittomäki 2012, 1; Wagner 1994, 139.) Lämmönsiirtymiskerrointa  $\alpha$  käytetään lämmönsiirron tehokkuuden laskuissa.

### 2.1.1 Säteily

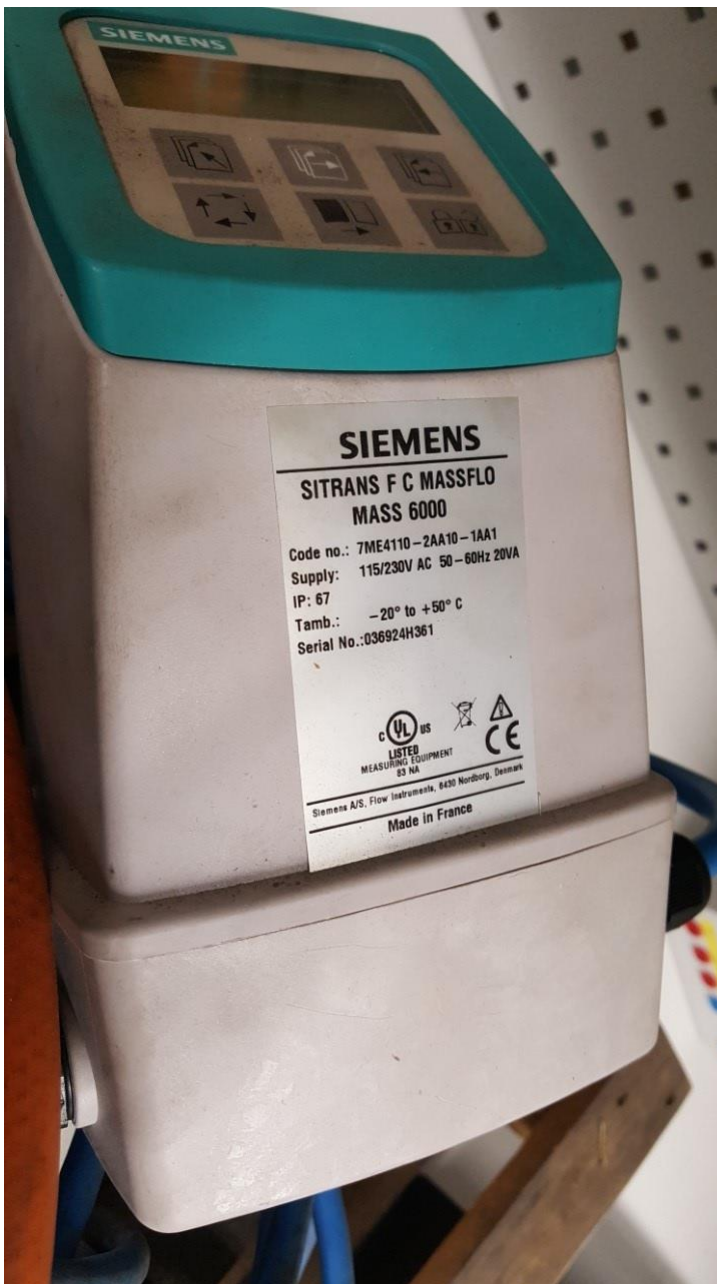
Säteily tai lämpösäteily on energian siirtymistä säteilylähteestä kohteeseen, jolloin lämpimämpi kohde säteilee kylmempään pintaan. Toisin kuin muut lämmönsiirtotyypit, säteily ei tarvitse väliainetta ja se siirtyy parhaiten tyhjiössä. Työssä käytettävästä virtausmittarista ulostulevan kaasun kuumentaminen tapahtuu induktiolämmittimellä, jonka kierukassa syntyvät pyörrevirrat säteilevät lämpöä kaasuun. Lämpösäteily on sähkömagneettisten aaltojen välityksellä tapahtuvaa energian siirtoa. Yleensä lämpösäteily on säteilyä, jonka aallonpituus on välillä  $\lambda=0,8\text{...}400\mu\text{m}$  ja alarajana on  $0,35\text{...}0,75\mu\text{m}$  oleva valo, jonka voi vielä nähdä. Säteily tulee näkyväksi korkeassa lämpötilassa ja sen energia kasvaa huomattavasti. (Hirvelä, Jokela, Kaappola & Kianta 2015, 14; Lampinen, Kotiaho & Seppälä 2007, 126; Wagner 1994, 117.)

### 2.1.2 Konvektio

Konvektiolle on kaksi tapaa, joista luonnollinen konvektio on lämmön siirtoa kaasussa tai nesteessä lämmön synnyttämien virtausten mukana. Virtaus aiheutuu lämpötilaerosta, jossa syntyvien tiheyserojen



vuoksi lämmin harva aine kohoaa ylöspäin ja kylmä harva aine vastaavasti laskeutuu alaspäin. Pakotettu konvektio taas on tehokkain tapa siirtää lämpöä, koska se voi siirtää virtauksen mukaan sitoutuneen lämpöenergian ja aineen virtaus saadaan toteutettua esimerkiksi puhaltimien ja pumppujen synnyttämän paine-eron avulla. (Hirvelä ym. 2015, 14.) Kaasun virtauksen syntymistä varten työssä käytettävä virtausmittari siirtää lämpöä jälkimmäisellä lämmönsiirtomekanismilla ja se on nimeltään Siemens Sitrans FC Mass 2100 -virtaussensori (KUVA 2.), jota ohjataan Siemens Sitrans FC Massflo Mass 6000 -lähettimen avulla (KUVA 1).



KUVA 1. Virtausmittarin lähetin



KUVA 2. Virtaussensorin tyyppikilven arvoja

Helpoiten tunnistettava ero luonnollisen eli vapaan konvektion ja pakotetun konvektion välillä on se, että jälkimmäinen virtaustapa on tehty ulkoisen, mekaanisen tekijän avulla. Vapaa konvektio tapahtuu sen sijaan tiheyden muutoksen vaikutuksesta ja sen lämmönsiirto on heikompaa verrattuna pakotettuun konvektioon. Laskuissa käytetään myös eri kaavoja ja pakotetulle konvektiolle se on muodossa:

$$Nu = Nu(Re, Pr) \quad (1)$$

jossa Nu on Nusseltin luku, Re on Reynoldsin luku ja Pr on Prandtin luku.

Nusseltin luvun kaava on:

$$Nu = \alpha \cdot d / \lambda \quad (2)$$

jossa  $\alpha$  on lämmönsiirtokerroin kerrottuna karakteristisella mitalla d, jonka tulo jaetaan lämmönjohtavuudella  $\lambda$ .

Reynoldsin luvun kaava on:

$$Re = v \cdot d \cdot \rho / \eta \quad (3)$$

jossa  $v$  on virtausnopeus,  $d$  on karakteristinen mitta ja  $\rho$  on tiheys ja näiden tulo jaetaan viskositeetilla  $\eta$ .

Prandtin luvun kaava on:

$$\eta \cdot c_p / \lambda \quad (4)$$

jossa ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa  $c_p$  kerrotaan viskositeetilla  $\eta$  ja näiden tulo jaetaan lämmönjohtavuudella  $\lambda$ .

Vapaalle konvektiolle pätee kaava:

$$Nu = Nu(Gr, Pr) \quad (5)$$

jossa käytetään Grashofin lukua  $Gr$ , jonka kaava on:

$$Gr = \beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 (T_s - T_\infty) / \eta^2 \quad (6)$$

jossa  $\beta$  on lämpölaajenemiskerroin,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $L$  on seinämän korkeus,  $T_s$  on seinämän korkeus ja  $T_\infty$  on ympäröivän ilman lämpötila ja näiden tulo jaetaan viskositeetilla  $\eta^2$ . (Lampinen, Kotiaho & Seppälä 2007, 125-126.)

Konvektiota kuvaavia yhtälöitä ei voida johtaa pelkästään teoriasta, vaan niiden saamiseksi on käytettävä puolikokeellisia korrelaatioita. Pääasiassa tämä johtuu siitä, että konvektion aiheuttama lämmönsiirto on monimutkainen ilmiö ja sitä varten ei ole yksinkertaista yhtälöä. Konvektion mallintamista yhtälöillä ei tule siis tarkastella absoluuttisena totuutena ja konvektio joudutaan siksi käsittelemään täysin omana lämmönsiirtymismuotonaan. Konvektioteoriaa monimutkaistaa lämmönsiirtokertoimen  $\alpha$  määrittäminen, koska sen lukuarvo on aina likimääräisesti suurin piirtein oikein ja se johtuu siitä, että laskutapa sisältää optimoituja tilanteita. (Inkinen & Tuohi 2002, 407-408; Lampinen, Kotiaho & Seppälä 2007, 121-126.)

Lämmönsiirtokertoimen määrittelyä varten käytetään yhtälöä:

$$q = \alpha (T_{\text{pinta}} - T_{\text{fluid}}) \quad (7)$$

jossa  $q$  on lämmönsiirto fluidin, joka voi olla kaasu tai neste ja kiinteän pinnan välillä ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) ja nesteen tai kaasun lämpötilan on oltava kaukana pinnasta. Lämmönsiirtokertoimelle varten laaditut kaavat tunnetaan nimellä korrelaatiokaavat, koska ne on normaalisti saatu teoreettisesti ja kokeellisesti. (Lampinen, Kotiaho & Seppälä 2007, 121.)

Kaavassa lämpövirta  $\Phi$  on lämpömäärä  $Q$  jaettuna ajalla  $t$ :

$$\Phi = Q/t \quad (8)$$

jonka yksikkö on watti (W). Lämpövirta kaava voidaan kirjoittaa myös käyttäen apuna massavirtaa  $q_m$ :

$$\Phi = q_m c \Delta T \quad (9)$$

jossa massavirta kerrotaan ominaislämpökapasiteetilla  $c$  ja lämpötilan muutoksella  $\Delta T$ . Inkisen ja Tuohen (2002, 408) kirjassa mainitaan, että kokeellisesti on voitu varmentaa konvektiosta syntyneen lämpövirran olevan suoraan verrannollinen pinta-alaan. Aineiden viskositeetti ominaisuuden seurauksena paikallaan olevan pinnan alueella luonnollinen konvektio pienenee ja siihen syntyy eristävä kerros. Tämä voidaan havaita kylmyyden tunteena tuulisella säällä, vaikka lämpötila onkin sama tyynellä säällä. Pakotettu konvektio sen sijaan ohentaa eristävän kerroksen paksuutta ja lämpövirta kulkee silloin helpommin. (Inkinen & Tuohi 2002, 407-408.)

### 2.1.3 Johtuminen

Johtuminen on lämmön siirtymistä aineen sisällä, ja eri aineilla on niille ominainen lämmönjohtavuus ja sen tunnus on  $\lambda$ . Johtumisessa lämpö voi siirtyä myös aineesta tai kappaleesta toiseen, jos ne ovat kosketuksissa toisiinsa eli se perustuu siihen, että kosketuksissa olevien kappaleiden lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan kuumemman kappaleen johtamalla lämpöä kylmempään kappaleeseen. Eristeenä onkin tarkoitus käyttää aineita, joilla on pieni lämmönjohtavuus. (Hirvelä ym. 2015, 14.)

Epästationaarisen lämmön johtumisen laskuissa käytetään kaavaa:

$$\lambda/c \cdot \rho \quad (10)$$

joka on lämmönjohtavuuden suhde ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden tuloon. Lämpötilan tasoittumiskertoimella  $\alpha$  voidaan esittää sama kaava eli  $\alpha = \lambda/c \cdot \rho$ . Lämpöenergian siirtymiseen johtamalla tarvitaan väliaine, jonka lämpötilan tasaantumisen nopeus on riippuvainen lämpötilan tasoittumiskertoimesta ja tasoittumiskertoimet ovat kaasuille ja metalleille suurimmat. (Wagner 1994, 28.)

## 2.2 Lämmönsiirtimien arvoja

Kaasun virtausnopeuden kasvaessa kasvaa lämmönsiirtymiskerroin, mutta samalla kasvaa myös painehäviö. Virtausnopeuden arvot lämmönsiirtimille, joissa painehäviö ei ole kovin suuri kaasuille, ovat väliltä 10...20 m/s. Jotta lämmönsiirtopinnat eivät tulisi liian suuriksi, olisi lämpimän ja kylmän väliaineen pienemmän lämpötilaeron oltava kaasuilla väliltä 10...25 K. Tutkimuksessa käytetty kaasu ei tarvitse lämmön siirtymiseen väliainetta, sillä työssä ei tarkasteltu johtumista. Alla on lueteltuna muutamia lämmönsiirtimissä olevia lämmönsiirtymiskerroin ( $\alpha$ ) arvoja. Lämmönsiirtotavat ovat vain kaasua varten tässä ja ne ovat vain suuntaa-antavia. Tutkimuksen virtausmittari toimii pakotetulla konvektiolla ja siksi sen arvot ovat hyödyllisempiä. Vapaan konvektion vaihteluväli on  $1 \dots 60\alpha$  ja sen normaali keskiarvo on  $10\alpha$ . Pakotetun konvektion vaihteluväli taas on  $1 \dots 250\alpha$  ja sen normaali keskiarvo on  $50\alpha$ . (Wagner 1994, 161.)

## 2.3 Ominaislämpökapasiteetti ja lämpökapasiteetti

Lämpötilaa koskevilla laskuilla on hyödyllistä selvittää kaasun ominaislämpökapasiteetti, joka on aineen energiasisältösuure ja joka kuvaa lämmön varastointikykyä. Ominaislämpökapasiteetin avulla voidaan laskea tutkimuksessa käytettävän kaasun jäähtymykseen tarvittava energian poisto ja sen avulla saadaan selville myös, paljonko energiaa täytyy tuoda kaasun lämmitykseen. Kappaleen lämpötilan noustessa  $\Delta T$ :n verran siihen täytyy tuoda lämpöä määrä  $Q$ . Suure  $Q$  on lämpömäärä ja se on suoraan verrannollinen lämpötilan muutokseen  $\Delta T$  ja kohteen massa  $m$  ja sen kaava on:

$$Q = cm\Delta T. \quad (11)$$

Verrannollisuuskerroin  $c$  on ominaislämpökapasiteetti ja sen yksikkö on  $J/(kgK)$  ja  $\Delta T$  on kappaleen lämpötilan muutos. Lämpömäärä tarkoittaa energian siirtoa lämpötilaeron seurauksena kappaleesta toiseen ja se ilmenee tutkimuksessa kuumen induktiolämmittimen siirtäessä energiaa kylmempään kaasuun. (Hautala & Peltonen 2005, 160; Inkinen & Tuohi 2002, 379-380.)

Ominaislämpökapasiteetti on materiaalin ominaisuus eikä kappaleen koolla ole väliä sen yhtälöissä. Työn esimerkkilaskuissa käytetään ominaislämpökapasiteettia vakiopaineessa. Ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa  $c_p$  ja ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa  $c_v$  erotetaan toisistaan, koska näillä saadaan eri tuloksia. Mainittujen  $c_p$ :n ja  $c_v$ :n suhde on vakio ja nämä löytyvät eri kaasuille taulukoista aiheen kirjallisuudesta. Ominaislämpökapasiteetin  $c$  sijasta voidaan käyttää lämmitettävän kappaleen lämpökapasiteettia  $C$ , jonka yksikkö on  $J/K$  ja se on hyödyllinen niissä laskuissa, joissa massa  $m$  on tuntematon ( $C = cm$ ). Lämmittämiseen tarvittava lämpömäärä voidaan siten esittää kaavalla:

$$Q = C\Delta T \quad (12)$$

josta ilmenee lämpökapasiteetin  $C$  käyttö ja  $\Delta T$  on lämpötilan muutos. (Hautala & Peltonen 2005, 160-161.)

Ominaislämpökapasiteetti riippuu täysin lämpötilasta, mutta reaalikaasujen osalta se riippuu myös paineesta vakiopaineessa  $c_p$ . Lämpökapasiteetti  $C$  on se energiamäärä, joka tarvitaan nostamaan aineen lämpötila 1 Kelvinillä ja sen kaava on:

$$C = Q/\Delta T \quad (13)$$

eli lämpömäärä jaettuna lämpötilan muutoksella. Aineelle saadaan ominaislämpökapasiteetti, kun lämpökapasiteetti jaetaan massalla ja sen kaava on  $c = C/m = Q/m\Delta T$ .

Siirtyviä lämpömääriä laskettaessa se on muodossa:

$$Q = cm\Delta T \quad (14)$$

josta huomataan sen massan, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan muutoksen olevan yhtä suuri kuin lämpömäärä  $Q$ . Aine, jolla on suuri ominaislämpökapasiteetti, tarvitsee enemmän energiaa massayksikköä kohti jonkin lämpötilannousun aikaansaamiseksi. (Inkinen & Tuohi 2002, 380-381; Lampinen 2013, 49.)

Aittomäen (2012, 3) kirjassa kerrotaan, että ominaislämpökapasiteetti on kappaleeseen viety lämpö jaettuna massalla lämpötilan muutosta kohti ja sitä määriteltäessä on sovittava prosessi. Kappaleeseen viety lämpö riippuu perättäisistä tilanmuutoksista eli prosesseista ja näistä prosesseista tärkeimmät määrittelyt ovat ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa  $c_v$  ja ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa  $c_p$ . Kun tilavuus on vakio, on tilavuudenmuutostyö nolla, jolloin  $c_v$  on  $c_v = \Delta u / \Delta T$ , ja paineen ollessa vakio se on  $c_p = \Delta h / \Delta T$ . Kaavassa  $\Delta u$  tarkoittaa ominaissisäenergiaa ja  $\Delta T$  lämpötilan muutosta. Nämä molemmat riippuvat tilasta eli paineesta ja lämpötilasta. Tässä vaiheessa on hyvä mainita, että ideaalikaasulle liittyvä kaava aiheeseen kirjoitetaan:

$$c_p - c_v = R/M = R^* \quad (15)$$

jossa  $R$  on yleinen kaasuvakio,  $M$  on moolimassa ja  $R^*$  on ainekohtainen ominaiskaasuvakio. (Aittomäki 2012, 3.)

Tasetilan lämpökapasiteetti vakiopaineessa  $C_p$  ja vakiotilavuudessa  $C_v$  ovat tilasuureita ja ne ovat mittoja sille, kuinka paljon lämpöä tasetila tarvitsee tietyn lämpötilaeron synnyttämiseksi sen ollessa jommankumman vakion vaikutuksen alla. Alaindeksi tunnukset  $p$  ja  $v$  ovat vakioita paineelle ja tilavuudelle. Tasetilan lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa kaava on:

$$C_v = (dU/dT)_v. \quad (16)$$

jossa tilavuus vakion määrittelyssä tuotu lämpö eli lämpötilan muutos  $dT$  prosessissa on sama kuin muutos tasetilan sisäenergiassa  $U$ .

Vakiopaineessa kaava on:

$$C_p = (dH/dT)_p \quad (17)$$

joka kuvaa muutoksen tasetilan entalpiassa  $H$  olevan sama kuin tuotu lämpö. Vakioiden ollessa riittävän tarkkoja saadaan kaavat tilavuuden ollessa vakiona  $Q = C_v\Delta T = C_v(T_2 - T_1)$  ja paineelle  $Q = C_p\Delta T = C_p(T_2 - T_1)$ . Tasetilan tarvitsema lämpömäärä  $Q$  prosessissa saadaan siis laskettua tasetilan lämpökapasiteetin ja kahden eri lämpötilan erotuksen tulosta ( $\Delta T$  lämpötilan muutos). (Wikstén 1998, 15.)

Luvun aikaisemmassa kappaleessa oli myös kaava sille, miten saadaan ominaislämpökapasiteetti lämpökapasiteetista, ja se noudattaa täysin samaa kaavaa tasetilan lämpökapasiteetille vakioiden kanssa eli tasetilan lämpökapasiteetit jaetaan massalla. Kaava kirjoitetaan silloin muodossa ominaislämpökapasiteetille vakiopaineessa  $C_p/m = c_p$  ja vakiotilavuudessa  $C_v/m = c_v$ . Tasetilan lämpökapasiteetti jaettuna tasetilan moolimäärällä  $N$  on molaarinen lämpökapasiteetti ja sen kaavat vakiotilavuudelle ja vakiopaineelle ovat  $C_v/N = C_{vm}$  ja  $C_p/N = C_{pm}$ . Molaariselle pätee kaava:

$$M = m/N \tag{18}$$

jossa nähdään, että molaarinen massa  $M$  saadaan jaettuna massa  $m$  moolimäärällä ja tämän vuoksi saadaan:

$$c_p = C_p/m = C_p/NM = C_{pm}/M \tag{19}$$

joten  $C_{pm} = c_pM$  ja vastaavasti tilavuudelle kaava on  $C_{vm} = c_vM$ . Lämpömäärä ilmaistuna ominaislämpökapasiteetilla tai molaarisella lämpökapasiteetilla saadaan kaavoista vakiopaineelle  $Q = c_p m \Delta T = C_{pm} N \Delta T$  ja vakiotilavuudelle  $Q = c_v m \Delta T = C_{vm} N \Delta T$ . Kaava on sama ominaislämpökapasiteetille silloinkin, kun ei käytetä vakioita. (Wikstén 1998, 15-16.)

Moolinen lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa  $C_v$  on lämpömäärä sille, joka tarvitaan yhden moolin suuruisen ainemäärän lämpötilan kohottamiseen yhdellä celsiusasteella tai kelvinillä, kun kaasun tilavuus ei muutu ja sen yksikkö on  $J/(\text{mol} \cdot \text{K})$ . Ainemäärän ollessa  $N$  tarvitaan lämpötilan muutosta  $\Delta T$ :n verran lämpömäärää lämmittämiseen vakiotilavuudessa ja sen kaava on  $Q = C_v N \Delta T$ . Tämä on käytännöllisempi yhtälö kaasuille kuin aikaisemmin mainittu kaava  $Q = cm\Delta T$ . Vakiotilavuudelle saatu kaava noudattaa samaa kaavaa vakiopaineelle  $C_p$  kaasun paineen ollessa muuttumaton, jolloin kaavan muodoksi vaihdetaan  $Q = C_p N \Delta T$ . (Hautala & Peltonen 2005, 160-162.)

Tiivistettynä lämpökapasiteetti on jonkin kappaleen kyky sitoa lämpöä itseensä. Se on ainekohtainen ominaisuus, joka saadaan laskettua jakamalla kappaleeseen tuotu lämpömäärä vastaavalla lämpötilan



muutoksella. Lämpökapasiteetti kuvaa sitä lämpömäärää, joka tarvitaan kohottamaan aineen lämpötilaa yhdellä kelvinillä tai celsiusasteella ja kaava tälle on  $C = Q/\Delta T(\text{K})$  tai  $C = Q/\Delta t(^{\circ}\text{C})$ . Lämpökapasiteetti ilmoitetaan yleensä aineen massayksikköä kohti laskettuna lämpökapasiteettina, joka on silloin ominaislämpökapasiteetti. Se saadaan laskettua jakamalla tunnettuun ainemäärään tuotu lämpömäärä kyseisen ainemäärän massan ja lämpötilan muutoksella. Kaava tälle on:

$$c = Q/m\Delta T \quad (20)$$

jossa joule J jaettuna massan kg ja lämpötilan muutoksen K tuloon tai  $Q/m\Delta t$  eli joule J jaettuna massan kg ja lämpötilan muutoksen  $^{\circ}\text{C}$  tuloon. Kuten aiemmin todettiin, lämpökapasiteetilla ja ominaislämpökapasiteetin välillä on yhteys  $c = C/m$  ja ne voidaan molemmat määritellä joko vakioaineessa  $C_p, c_p$  tai vakioilavuudessa  $C_v, c_v$ . Tutkimuksen viitekehystenä käytetään kaasuja, minkä vuoksi on hyvä mainita, että ilman ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa ja normaalissa lämpötilassa on  $1000 \text{ J/kg K}$ . Kaasuja käsittelevän luvun neljännessä alaluvussa tälle on esimerkki laskutoimitus ilmaa varten. (Hirvelä ym. 2015, 245.)

### 3 KAASUN OMINAISUUDET JA YHTEYS LÄMPÖTILAAN

Kaasusta ja nesteestä käytetään nimitystä fluidi. Kaasu on aineen olomuoto, millä ei ole stabiilia tilavuutta tai muotoa. Suvanto (2003, 318) mainitsi teoksessaan, että kaasun rakenneosien väliset voimat eivät pysty estämään ainekerroksien liukumista toistensa suhteen, minkä seurauksena kaasu pyrkii täyttämään tilan, jossa sitä on. Tämän voi kuvitella niin, että kaasu virtaa vapaasti tilassa ja kaasun tavoite on saavuttaa mahdollisimman suuri tilavuus. (Hautala & Peltonen 2005, 104; Suvanto 2003, 317-318.) Tyypillisiä tunnettuja aineita, jotka esiintyvät tässä muodossa normaalissa lämpötilassa, ovat esimerkiksi happi, helium, typpi ja vety. Tutkimuksessa oli tarkoitus mitata kaasun lämpötila, jonka vuoksi tässä luvussa tarkasteltiin lämpötilan vaikutusta kaasun ominaisuuksiin. Ominaislämpökapasiteetin lisäksi kaasulle oli mahdollista määrittellä muita suureita liittyen lämpötilaan, joita esiteltiin tässä luvussa.

#### 3.1 Kaasun lämpöliike

Lämpötilan nousu aiheuttaa kaasumolekyyleissä lämpöliikettä ja ideaalikaasun lämpötila-asteikko yhtyy kelvineitä käyttävään absoluuttiseen lämpötila-asteikkoon. Absoluuttisen lämpötilan tunnus on T ja se on verrannollinen kappaleen molekyylien liike-energiaan. Kaasun molekyylit liikkuvat nopeasti ja ne ovat etäällä toisistaan, minkä seurauksena kaasun molekyylit törmäävät jatkuvasti säiliön seinämiin ja törmäyksiä tapahtuu enemmän, jos kaasua on paljon pienessä säiliössä. Mitä suurempi on kaasun molekyylien lukumäärä tilavuusyksikköä kohden, joka lisää molekyylien törmäyksiä, sitä suurempi on kaasun säiliön seiniin keskittyvä voima. Lämpötilan noustessa molekyylien liike nopeutuu ja törmäysten määrä kiihtyy. Kaasun ainemäärän, lämpötilan, paineen ja tilavuuden välinen yhteys saadaan kaasujen tilanyhtälöstä  $pV = NRT$  ja tätä kaavaa tullaan tutkimaan tarkemmin ideaalikaasun laskemista käsittelevässä luvussa. Tämä kaava soveltuu paremmin tutkittaessa ideaalikaasuja, mutta soveltuu myös reaalikaasuja varten normaaliolosuhteissa. (Antila, Karppinen, Leskelä, Mölsä & Pohjakallio 2010, 43; Paakkari 1997, 6.)

Kaasun tilavuus laajenee, kun sitä lämmitetään, ja ilmiöstä käytetään yleisesti termiä lämpölaajeneminen. Kaasujen lämpökäyttäytymistä voidaan tutkia kaasujen tilanyhtälöllä. Tämä tulee yksinkertaisesti esille, kun saman kaasun tilanmuuttujia tutkitaan kahdessa eri tilassa. Yhtälössä  $p_1V_1/T_1 = p_2V_2/T_2$  voidaan esittää sama kaasu kahdessa eri tilassa, jota alaindeksit 1 ja 2 indikoivat paineelle, tilavuudelle ja

lämpötilalle. Kaasun tilanmuutos on isobaarinen, jos paine on vakio, minkä seurauksena yleinen tilanyhtälö muuttuu yhtälöksi  $V_1/T_1 = V_2/T_2$ . Isotermisessä tilanmuutoksessa lämpötila on vakio ja siitä käytetään yhtälöä  $p_1V_1 = p_2V_2$ . Isokoorisessa tilanmuutoksessa tilavuus pysyy vakiona ja yhtälö kirjoitetaan muodossa  $p_1/T_1 = p_2/T_2$ . (Hautala & Peltonen 2005, 158, 210-211.)

### 3.2 Lämmön siirtyminen kaasussa

Kaasuissa lämmön siirtyminen johtumisella perustuu kaasun vapaaseen liikkeeseen lämpötilaeroista tai pakotettuna konvektion avulla, ja jälkimmäistä tapaa oli tarkoitus hyödyntää tutkimusprosessissa virtausmittarilla. Lämmön siirtymisessä on hyvä erottaa toisistaan lämpötilojen tasoittuminen ja siirtynyt lämpömäärä. Tutkimuksessa oli tavoitteena laskea ominaislämpökapasiteetti ja sen avulla pystyä kertomaan, kuinka nopeasti lämpötilaerot tasoittuvat lämmitetyssä kaasussa (Hautala & Peltonen 2005, 165.)

Laskuissa, jotka käsittelevät lämmön siirtymistä johtumalla riippuen ajasta, käytetään Fourierin I. lakia, jonka kaava  $q = -\lambda(\Delta T/\Delta x)$  kertoo sen, paljonko lämpöä aikayksikössä siirtyy jonkin pinnan läpi ja lämpötilat tasoittuvat lämpöenergian virtauksen seurauksena. Kaavassa lämpövirran tiheys (tunnus  $q$ ) riippuu vain lämpötilagradientista  $\Delta T/\Delta x$  ja lämmönjohtavuudesta  $\lambda$ . Lämpötilan tasoittuminen riippuu lämmön virtausnopeuden lisäksi myös kappaleen lämpökapasiteetista  $C$ , joka tarkoittaa lämmön määrää kappaleessa. Hautalan ja Peltosen (2005, 179) mukaan Fourierin II. lain kaavassa kertoimella  $\lambda/(cp)$  tarkoitetaan kappaleen ominaislämpökapasiteetin  $c$  ja tiheyden  $\rho$  tuloa jaettuna lämmönjohtavuudella  $\lambda$  ja se on yhtä suuri kuin lämpötilan tasoittumiskerroin  $\alpha$ . Lämpötilan tasoittumiskertoimen yksikkö on  $m^2/s$  ja se kertoo, kuinka nopeasti lämpötila tasoittuu. Ratkaisemalla Fourierin II. laki  $d^2T/dx^2 = cp/\lambda \cdot dT/dt$  yksinkertaisissa tapauksissa nähdään, että ajassa  $t$  lämmön siirtymismatkan  $x$  suuruusluokka saadaan yhtälöstä  $x^2 = \alpha t$ , mikä tarkoittaa kaksinkertaisen matkan siirtymisen vaativan nelinkertaisen ajan ja kaasuille  $\alpha$  on  $10^{-5} m^2/s$ . Tätä ei kuitenkaan tarkasteltu työssä käytännössä tai teoriassa, koska siinä ei tutkittu väliaineen kautta johtumalla tapahtuvaa lämmön siirtoa ja ilma kaasuna on huono lämmönjohde verrattuna kiinteään aineeseen. Tämä teoria sopisi vaihtoehtoisesti tutkittaessa kiinteiden aineiden lämmön siirtymistä. (Hautala & Peltonen 2005, 165, 178-180.)

Konvektiolla tehtävä lämmönsiirto oli oleellinen osa tutkimusta ja konvektioilmiön syynä on lämpötilaero pinnan ja sitä ympäröivän kaasun välillä, jossa tapahtuu lämpöenergian siirtymistä. Konvektiolla tapahtuva lämpövirran tiheys  $q$  (yksikkö  $W/m^2$ ) kuvataan lämmönsiirtokertoimen  $\alpha$  avulla ja kaava sille on  $q = \alpha (T_p - T_y)$ . Pinnan lämpötilan tunnus on  $T_p$  ja  $T_y$  on ympäröivän ilman lämpötila. Konvektiivisen

lämmönsiirtokertoimen  $\alpha$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) lukuarvo riippuu pinnan päällä virtaavasta aineesta ja siinä olevasta virtauskentästä. Suuruusluokka kaasuvirtauksille on  $\alpha = 5 \dots 100 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  riippuen virtausnopeudesta. Tunnettaessa konvektio ja johtuminen saadaan selville seinän lävitse tapahtuvaa lämpöhäviötä ja ne ovat hyödyllisiä kaavoja rakennusosalalla. (Lampinen 2013, 23.)

Hautala ja Peltonen (2005, 173) mainitsevat, että konvektiossa tapahtuvassa virtauksessa on yksinkertaista laskea virtauksen mukana ajassa  $t$  siirtyvä lämpövirta. Lämpövirta  $\Phi$  saadaan laskettua kaavalla  $\Phi = Q/t = mcT/t = cT \cdot m/t$ . Tulokseksi saadaan  $\Phi = cTq_m$ , jossa  $q_m = m/t$  on massavirta ( $\text{kg}/\text{s}$ ). Edellä mainitussa kaavassa:

$$Q/t = mcT/t \tag{21}$$

jossa nähdään lämpömäärä  $Q$  jaettuna ajalla  $t$ , saadaan laskettua kertomalla virtauksen lämpötila  $T$ , kaasun ominaislämpökapasiteetti  $c$  ja kaasun massa  $m$ , joka jaetaan ajalla  $t$ . Kaavalla saadaan tarvittaessa laskettua tutkimuksessa käytettävän virtausmittariin menevän ja sieltä poistuvan kaasun lämpötilan muutos. (Hautala & Peltonen 2005, 173.)

### 3.3 Ideaalikaasu

Ideaalikaasu noudattaa Boylen lakia kaikissa lämpötiloissa ja paineissa ja lain kaavan mukaan  $pV$  eli paineen ja tilavuuden tulo on vakio, kun lämpötila  $T$  on vakio. Se on reaalikaasun matemaattisesti yksinkertainen malli, minkä takia reaalikaasu esimerkeissä käytetään ideaalikaasujen teoriaa pohjana. Tiedetyt reaalikaasut noudattavat ideaalikaasun tilanyhtälöä, jos lämpötila on nesteyttämislämpötilan yläpuolella ja paine ei ole korkea ja happi huoneessa on esimerkiksi tällainen kaasu. Ideaalikaasun molekyyleillä ei ole vuorovaikutusta keskenään ja tämä ominaisuus selittää sen, miksi kaasun molekyylien törmätessä astian seinämiin molekyylit ovat niin kimmoisia. (Inkinen & Tuohi 2002, 434-436; Hautala & Peltonen 2005, 210.)

Ilma on normaalissa paineessa lähellä ideaalikaasua, koska se on harvaa kaasua tässä olosuhteessa ja se on tutkimuksen opetuslaitteiston käyttöä varten hyvä kaasu sen ollessa koko ajan ympärillä. Ideaalikaasun käyttämisen etuna on myös sen yksinkertainen laskukaava. Ideaalikaasun sisäenergia riippuu lämpötilasta ja kaasun ainemäärästä ja tietyssä lämpötilassa keveimmät molekyylit liikkuvat keskimäärin

nopeimmin. Todellisten kaasujen lämpötila eli reaalikaasujen sisäenergia riippuu suuressa määrin lämpötilasta, mutta myös paineesta ja tilavuudesta. (Aittomäki 2012, 6; Inkinen & Tuohi 2002, 362, 380.)

### 3.4 Kaasun ominaislämpökapasiteetti

Ideaalikaasut ja reaalikaasut noudattavat samoja lakeja, koska kaasun paineen lähentyessä nolaa reaalikaasu lähenee ideaalikaasutilaa, eikä niillä ole silloin yksilöllisiä eroja. Esimerkiksi ideaalikaasun sisäenergia ja lämpökapasiteetit riippuvat ainoastaan lämpötilasta, ei paineesta. Ilman kaasut typpi ja happi noudattavat hyvin ideaalikaasulakeja, vaikka paine olisi nollan ylikin huoneenlämpötilassa ja ilma voidaan luokitella tutkimuksessa ideaalikaasuksi. Ideaalikaasut noudattavat yhtälöä:

$$pV = (m/M) \cdot RT = NRT \quad (22)$$

jossa paine eli  $p$  on vakio ja sen yksikkö on  $N/m^2 = 10^{-5}$  bar,  $V$  on tilavuus ja sen yksikkö on  $m^3$ ,  $m$  on tasetilan massa ja sen yksikkö on kg,  $M$  on tasetilan molaarinen massa ja sen yksikkö on kg/mol,  $N$  on tasetilan ainemäärä ja sen yksikkö on kmol,  $T$  on tasetilan lämpötila ja sen yksikkö on K,  $R$  on yleinen kaasuvakio = 8314,3 J/kmol\*K. (Wikstén 1998, 16-17.)

Ideaalikaasujen molaarisille lämpökapasiteeteille pätee yhtälö:  $C_{pm} - C_{vm} = R$ . Kineettisessä kaasuteoriassa dimensiottomille molaarisille lämpökapasiteeteille (molaarinen lämpökapasiteetti vakioaineessa tai vakiotilavuudessa jaettuna yleisellä kaasuvakiolla  $R$ ) pätevät kaavat:

$$C^*_{pm} = C_{pm}/R = C_p/NR = 2,5 \text{ (yksiatomiset kaasut; helium, argon, Hg)} \quad (23)$$

$$C^*_{vm} = C_{vm}/R = C_v/NR = 1,5 \text{ (yksiatomiset kaasut; helium, argon, Hg)} \quad (24)$$

$$C^*_{pm} = C_{pm}/R = C_p/NR = 3,5 \text{ (2-atomiset kaasut; O}_2\text{, N}_2\text{, H}_2\text{, ilma)} \quad (25)$$

$$C^*_{vm} = C_{vm}/R = C_v/NR = 2,5. \text{ (2-atomiset kaasut; O}_2\text{, N}_2\text{, H}_2\text{, ilma)} \quad (26)$$

Ideaalikaasun sisäenergia riippuu vain lämpötilasta, jolloin tähän pätee kaava  $dU/dT = C_v(T)$ . Lämpökapasiteetin pysyessä vakiotilavuudessa ideaalikaasuille, se voidaan todeta kaavassa  $\Delta U = C_v\Delta T = c_{vm}\Delta T = C_{vm}N\Delta T$ . Koska entalpia  $H$  suuruus on  $H = U + pV$ , niin se riippuu ideaalikaasuyhtälön  $pV =$

NRT mukaan vain lämpötilasta ja sen kaava on  $dH/dT = C_p(T)$ . Tälle voidaan myös todeta lämpökapasiteetin ollessa vakioaineessa ideaalikaasulle kaava  $\Delta H = C_p\Delta T = c_{pm}\Delta T = C_{pm}N\Delta T$ . (Wikstén 1998, 17.)

Wiksténin (1998, 17) teoksessa on esimerkki ratkaisu sille, miten saadaan arvioitua ilman ominaislämpökapasiteetti. Ratkaisu saadaan kaavasta:

$$C^*_{pm} = c_pM \text{ eli } C^*_{pm} = c_pM/R \quad (27)$$

jossa  $c_pM$  on ominaislämpökapasiteetin vakioaineessa ja molaarisen massan tulo. Ilman osalta todettiin aikaisemmassa kaavassa, että ilman  $C^*_{pm} = 3,5$  ja ilman molaarinen massa  $M$  on 28,965 kg/kmol. Yhtälöksi saadaan  $c_p = R \cdot C^*_{pm}/M = ((8314,3 \cdot 3,5) / 28,965) \text{ J/kg K} = 1005 \text{ J/kg K} = 1,005 \text{ kJ/kg K}$ . Ominaislämpökapasiteetille saadaan eri arvoja eri lämpötiloissa. Ilman paineen ollessa 1 atm ja lämpötilan 27 °C se on  $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg K}$ , lämpötilassa 50 °C arvo on 1,008 kJ/kg K ja lämpötilassa 227 °C se on 1,030 kJ/kg K eli ominaislämpökapasiteetin nähdään olevan kasvava lämpötilan funktio ja antavan tarkkoja arvoja korkeissakin lämpötiloissa. Kaasuturbiinivoimalaitoksen laskelmissa ominaislämpökapasiteetin riippuvuus lämpötilasta on otettava huomioon, jotta saadaan tarkkoja tuloksia. (Wikstén 1998, 18; Incropera & DeWitt, D.P. 1990, 919.)

Molaarinen ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa  $c_p$  (tai tilavuudessa  $c_v$ ) määritetään kokeellisesti kalorimetrissä. Kaasuille se voidaan määrittellä tilastollisen termodynamiikan avulla spektroskooppisen tiedon perusteella. Yhtälönä käytetään:

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (28)$$

ja lämpötila on  $T$  tunnuksen mukaan kelvin asteissa. Lampisen (2013, 50) teoksessa tälle on esimerkkilasku typpikaasun ominaislämpökapasiteetille. Typpikaasulle  $N_2(g)$  luvut  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ja  $d$  pätevät lämpötila-alueella 300-1500K, jossa ne ovat  $a = 27,3$  /  $b = 5,23 \cdot 10^{-3}$  /  $c = -4,19 \cdot 10^{-9}$  ja  $d = 0$ . Lämpötilassa 300 K typpikaasun molaariseksi ominaislämpökapasiteetiksi saadaan  $c_p = 27,30 + 5,23 \cdot 10^{-3} \cdot 300 - 4,19 \cdot 10^{-9} \cdot 300^2 + 0 = 28,9 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ . Lämpötilassa 1500 K saman kaavan avulla saadaan  $c_p = 35,1 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ . (Lampinen 2013, 50.)

Kaasun sisäenergia muuttuu lämpömäärän siirrolla, joka muuttaa sen liike-energiaa, kuten esimerkiksi lämpötilaa nostettaessa molekyylien liike-energia vilkastuu. Vakiotilavuudessa olevaan kaasuun suljetussa tilassa, jos lämpötilan muutos on  $\Delta T$ . Siirtyvä lämpöenergia kuvataan kaavalla:

$$Q_v = nC_{mv}\Delta T \quad (29)$$

jossa  $C_{mv}$  on kaasun moolinen lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa ja  $n$  on ainemäärä. Kun tilavuus on vakio, rajapinnan läpi siirtyvä lämpöenergia on sama kuin kaasun sisäenergian muutos  $\Delta U$ , joten  $Q_v$  on yhtä suuri kuin  $\Delta U$  ( $\Delta U = nC_{mv}\Delta T$ ). Moolisen lämpökapasiteetin  $C_m$  sijasta laskuissa käytetään myös ominaislämpökapasiteettia  $c$ . Silloin kaavaksi vaihdetaan  $nC_{mv} = mc_v$ , jossa  $m$  on kaasun massa ja  $c_v$  ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa. Sisäenergian muutos on siten myös  $\Delta U = mc_v\Delta T$ , kuten moolisen lämpökapasiteetin kohdassa. Yhtälöissä lämpökapasiteetit on oletettu vakioiksi, koska se pätee ideaalikaasuille. Ideaalikaasujen sisäenergia riippuu vain lämpötilasta ja tässä luvussa käytetyt yhtälöt ovat voimassa muissakin kuin vain vakiotilavuudessa tapahtuvissa tilanmuutoksissa. (Inkinen & Tuohi 2002, 440.)

Kaasuissa molekyylit liikkuvat suurella nopeudella vapaasti tilassa, kuten jo lämpöä käsittelevässä luvussa todettiin. Lämmönjohtavuus riippuu tämän perusteella ominaislämpökapasiteetista  $c$  ja viskositeetista  $\eta$ . Suuruusluokka on väliltä  $\lambda = 0,01 \dots 0,025$  lukuun ottamatta  $H_2$ - ja  $He$ -kaasuja. Lämmönjohtavuus  $\lambda$  on  $W/(m \cdot K)$  eli watti jaettuna metrin ja kelvinin tulosta. Lämmönjohtavuus on painevälillä 0,1...10 bar ja 20 °C:n lämpötilassa se on arviolta:

$$\lambda_{20^\circ C} \approx \eta \cdot c_p \cdot (9 - (5/\chi))/4, W/(m \cdot K) \quad (30)$$

jossa  $\chi$  on isentrooppiekspONENTTI,  $c_p$  on ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa ja  $\eta$  on dynaaminen viskositeetti ( $Pa \cdot s = Pascalin$  ja ajan tulo). Tutkimusprosessissa lämmönjohtavuudesta riippuva ominaislämpökapasiteetti ei kuitenkaan sisälly työhön, koska tätä mekanismia ei tarvita opinnäytetyössä, mutta myös tämän mahdollisuus on hyvä kertoa. (Wagner 1994, 16.)

### 3.5 Ominaislämpökapasiteetin määrittäminen

Kaasujen ominaislämpökapasiteetti on polynomifunktio lämpötilan funktiona. Integroimalla saadaan helposti laskettua ominaislämpökapasiteetti. Taulukosta 1 nähdään eräiden ideaalikaasujen vakioita. Polynomifunktion lauseke on  $c_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$ , joka esiintyi aikaisemmassa esimerkkilaskussa luvussa 3.4.

Ideaalikaasulle molaarinen ominaissisäenergia  $u$  (yksikkö J/mol) on ainoastaan lämpötilasta riippuvainen eli  $u = u(T)$ . Vastaavasti molaarinen ominaisentalpia  $h$  (yksikkö J/mol) on lämpötilan funktio  $h = h(T)$ . Tämän vuoksi molaarinen ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa  $c_p$  (yksikkö J/mol\*K) on vain lämpötilan funktio  $c_p = c_p(T)$ . Molaariset suureet soveltuvat paremmin kemian termodynamiikkaan ja muissa tehtävissä käytetään massayksikköä kohden laskettuja ominaissuureita ja  $c_p$  ominaislämpökapasiteetin yksikkö vakioaineessa on silloin J/kg K. Lampisen (2013, 46) teoksessa on esimerkki ominaisuureita ja molaarista suuretta käyttäen, jossa ilman ominaislämpökapasiteetti 20 °C:n ja 1 baarin paineessa on noin:  $c_p = 1.0 \text{ kJ/kg K}$  ja  $c_p = 0.029 \text{ kg/mol} \cdot 1,0 \text{ kJ/kgK} = 29.0 \text{ J/mol*K}$ . Tunnukset  $c_p$  ovat samat molemmille ominaissuureille, mutta lähdemateriaalin tavoin toinen niistä voidaan selkeyden vuoksi kursivoida merkitsemään molaarista suuretta eli  $c_p$ . Suureen valinta ei vaikuta termodynamiikan peruskaavoihin, mutta laskuissa tulee eroja. (Lampinen 2013, 45-46.)

TAULUKKO 1. Kaasujen polynomisovitteet vakioaineessa (J/mol\*K)

Aine	a	b	c	d	Lämpötila- alue K
CO <sub>2</sub>	22,26	5,981*10 <sup>-2</sup>	-3,501*10 <sup>-5</sup>	7,469*10 <sup>-9</sup>	273-1800
H <sub>2</sub>	29,11	-0,1916*10 <sup>2</sup>	0,4003*10 <sup>-5</sup>	-0,8704*10 <sup>-9</sup>	273-1800
H <sub>2</sub> O	32,24	0,1923*10 <sup>-2</sup>	1,055*10 <sup>-5</sup>	-3,595*10 <sup>-9</sup>	273-1800
N <sub>2</sub>	28,90	-0,1571*10 <sup>-2</sup>	0,8081*10 <sup>-5</sup>	-2,873*10 <sup>-9</sup>	273-1800
O <sub>2</sub>	25,48	1,520*10 <sup>-2</sup>	-0,7155*10 <sup>-5</sup>	1,312*10 <sup>-9</sup>	273-1800
SO <sub>2</sub>	25,78	5,795*10 <sup>-2</sup>	-3,812*10 <sup>-5</sup>	8,612*10 <sup>-9</sup>	273-1800
ilma	28,11	0,1967*10 <sup>-2</sup>	0,4802*10 <sup>-5</sup>	-1,966*10 <sup>-9</sup>	273-1800

(mukailten Ideal-gas specific heats of various common gases (Continued) 2020)

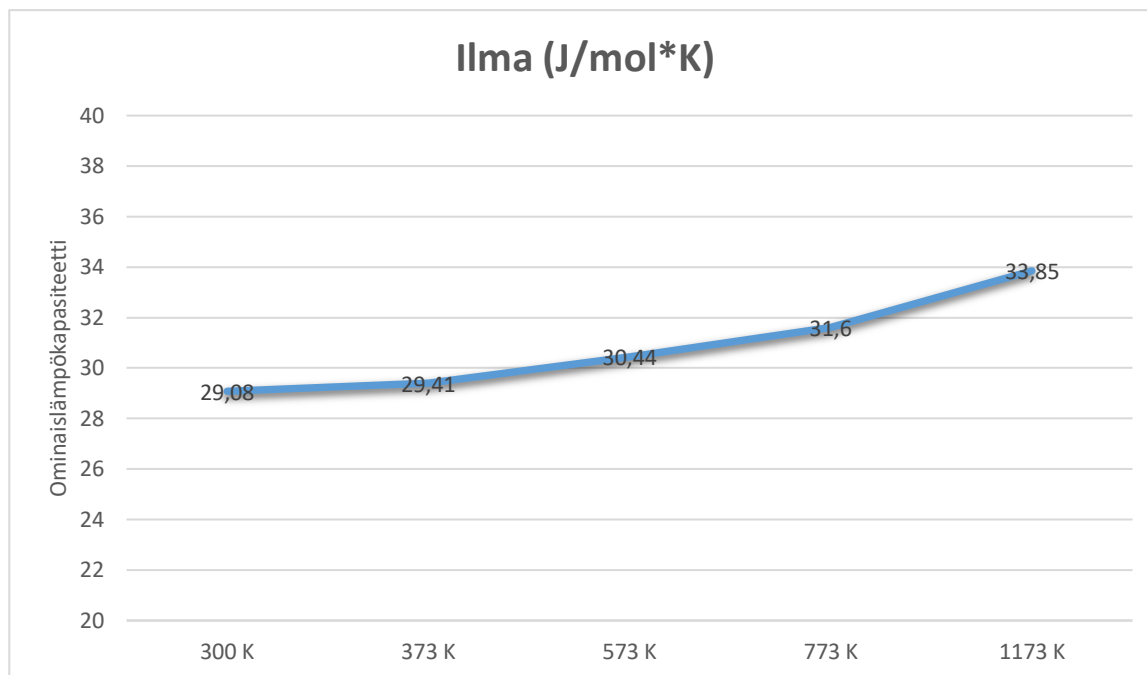


Kertoimet a...d haettiin eri kaasuille nettisivuston (Ideal-gas specific heats of various common gases (Continued) 2020) taulukosta ja nämä vakiot on saatu kokeellisesti vakiopaineessa eli  $c_p$  (TAULUKKO 1). Kunkin aineen kohdalle on merkitty lämpötila-alue, jossa näitä vakioita voidaan käyttää eli lämpötila-alueen ulkopuolella polynomifunktiosta saadut tulokset olisivat virheellisiä. Työssä käytettiin lämmittimenä induktiolämmittintä lämpötila-alue (K) arvon saamiseksi. Kaasun lämpötilasta voi arvioida lämmittimen tehoa ominaislämpökapasiteetin avulla ilman polynomisovitusta ja sen avulla.

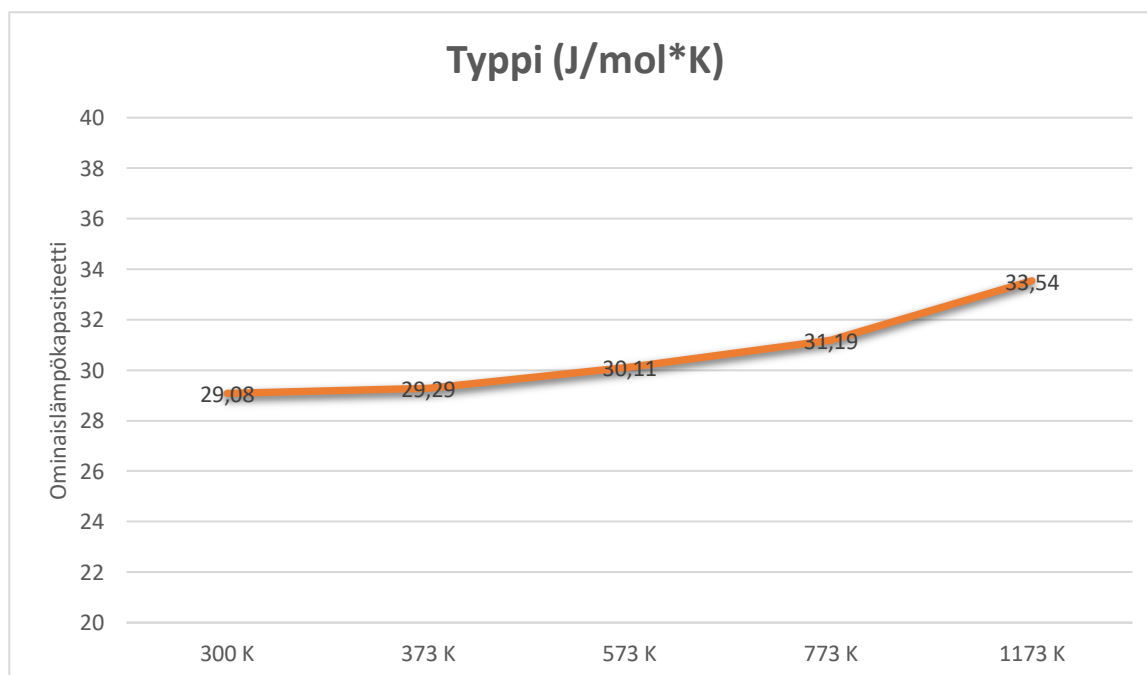
TAULUKKO 2. Eri kaasujen ominaislämpökapasiteetteja (J/mol\*K)

Kaasu/T	300 K	373 K	573 K	773 K	1173 K
Happi O <sub>2</sub>	29,43	30,22	32,09	33,56	35,58
ilma	29,08	29,41	30,44	31,60	33,85
Typpi N <sub>2</sub>	29,08	29,29	30,11	31,19	33,54
Vety H <sub>2</sub>	28,87	28,91	29,12	29,62	30,97

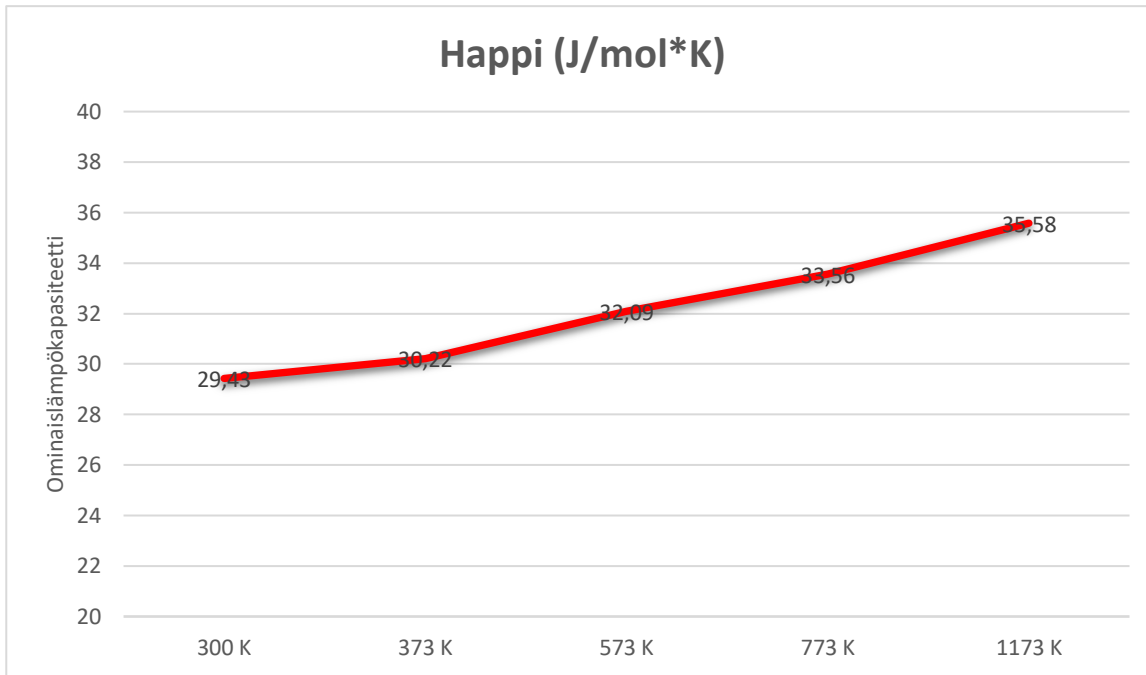
Sijoittamalla taulukon 1 arvot kaavaan  $a + bT + cT^2 + dT^3$  saadaan tämän avulla laskettua kaasujen ominaislämpökapasiteetit tietyltä lämpötila-alueelta. Taulukon 2 lukemista nähdään, että ominaislämpökapasiteetilla on lämpötilariippuvuutta. 300 K on noin 27 celsiusastetta ja paine on vakio eli  $c_p$ . Monilla induktiolämmittimillä saavutetaan 900 °C:n lämpötila ja taulukossa 2 lämpötila 1173 K on sen vuoksi valittu viimeiseksi tarkasteltavaksi lämpötilaksi. Viivakaavioista (KUVIO 1-4.) voi havaita helposti sen, kuinka lämpötilan nousu vaikuttaa ominaislämpökapasiteetin käyttäytymiseen. Esimerkkilaskuissa on käytetty molaarisia polynomivakioita (TAULUKKO 1.), koska ne ovat useammin käytössä ja täten helpommin saatavilla. Kuten aikaisemmin todettiin, ominaislämpökapasiteetilla ja molaarisella ominaislämpökapasiteetilla ei ole muuta eroa kuin yksikkö ja kaavaa  $a + bT + cT^2 + dT^3$  käytetään molemmissa laskuissa.



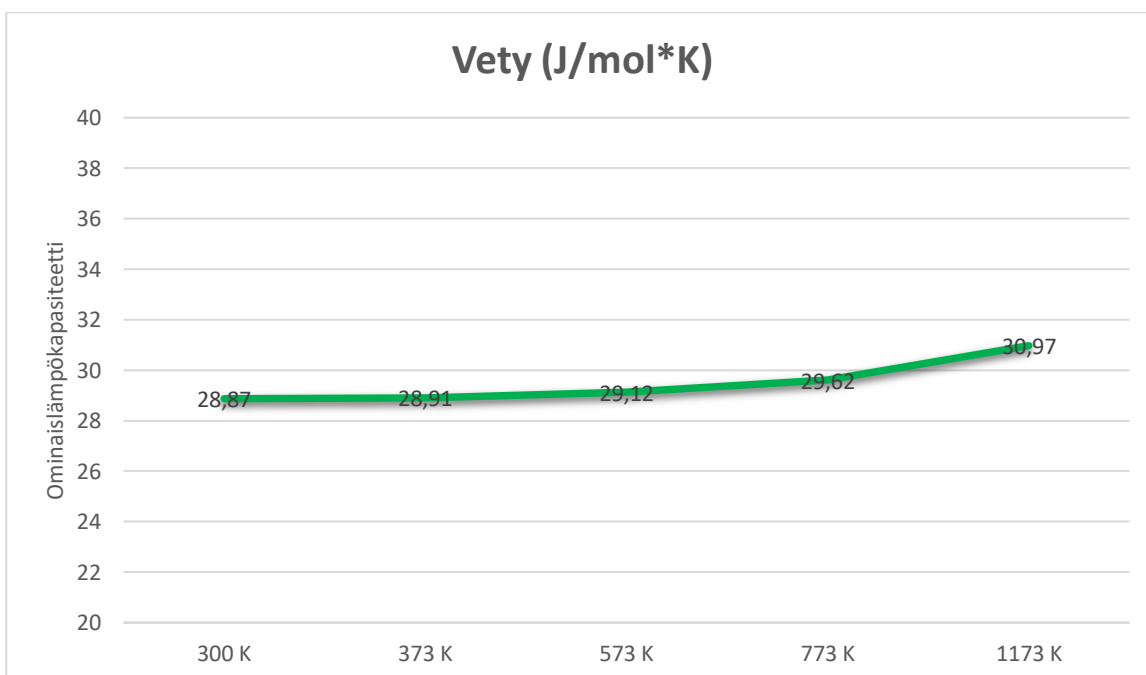
KUVIO 1. Ilman molaarisia ominaislämpökapasiteetteja



KUVIO 2. Typen molaarisia ominaislämpökapasiteetteja



KUVIO 3. Hapen molaarisia ominaislämpökapasiteetteja



KUVIO 4. Vedyn molaarisia ominaislämpökapasiteetteja

Taulukon 2 laskettuja arvoja voidaan verrata Lampisen (Lampinen 2013, LIITE 4) kirjan lähdemateriaalin oletettuihin ominaislämpökapasiteetteihin, jotka ovat esillä oikeanpuoleisessa sarakeessa (TAULUKKO 3). Osalla näistä tuloksista ei ole keskenään suurta eroa, mutta tässä kuitenkin korostuu se, että yhtälön käyttämisestä on hyötyä ja ominaislämpökapasiteetit kannattaa laskea itse. Hapen kohdalla huomataan suurin ero ja sen vuoksi on hyvä pitää mielessä, että eri lähdemateriaalien vakiot eivät ole täysin

yhteneviä. Aikaisemmassa esimerkki laskussa käytettiin Lampisen (2013, 50) antamia vakioita typelle samassa lämpötilassa 300 K ja vastaukseksi saatiin 28,9 J/mol\*K, jonka perusteella voidaan tulla siihen johtopäätökseen, että tarkkoja tuloksia ei kannata olettaa ilman itse laskemista (Lampinen 2013, 50).

TAULUKKO 3. Ominaislämpökapasiteetin vertailu (J/mol\*K)

Aine/T	300 K (laskettu)	300 K (oletettu)
Happi O <sub>2</sub>	29,43	29,17
Typpi N <sub>2</sub>	29,08	29,11
Vety H <sub>2</sub>	28,87	28,88

(mukaan Lampinen 2013, LIITE 4)

### 3.6 Kaasun lämpöteho/lämpövirta

Ominaislämpökapasiteetin lisäksi työssä voitiin laskea tarvittaessa kaasun lämmittämisen tiettyyn lämpötilaan tarvittava lämpöteho tai toiselta nimeltä lämpövirta. Lämpöteholla (tunnus  $\Phi$ ) tarkoitetaan työllä kappaleen lämmittämiseen tai jäädyttämiseen lämpötilasta  $T_1$  lämpötilaan  $T_2$  kuluva lämpömäärä  $Q$  (yksikkö J). Lämpöteho voidaan laskea kaavalla:

$$\Phi = Q/t \tag{31}$$

kun tiedetään prosessissa käytetty aika, jota pieni  $t$  merkitsee ja vastaus annetaan tehon yksikössä  $W$  watti. Watti määritellään työ, eli Joule (J) jaettuna ajalla  $s$  eli sen kaava on  $J/s = W$ . Lämpöä ja työtä voidaan mitata samoilla energiayksiköillä, kuten ensimmäisessä luvussa todettiin. Lämpötehon kaava voidaan esittää myös muodossa  $\Phi = mc_p(T_2 - T_1) / t$  ja kaavassa  $m$  on massa,  $T_2 - T_1$  lämpötilan muutos ( $\Delta T$ ) ja  $c_p$  on ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa. Vaihtoehtoisesti lämpöteho voidaan laskea käyttäen celsiusyksikköä ja kaavan muoto on silloin  $mc_p(t_2 - t_1) / t$ . Tämän laskeminen oli tutkimuksessa siksi mahdollista, koska prosessin virtausmittarin avulla on mahdollista saada tiedot virtaavan kaasun tilavuus- tai massavirrasta ja se, kuinka paljon kaasu lämpenee. Silloin lämpöteho voidaan kirjoittaa muodossa  $\Phi = \dot{m}c_p\Delta T$  ja massavirran tunnus on kaavoissa joko  $\dot{m}$  tai  $q_m$  (yksikkö kg/s). Lämpöenergia  $E$  eli lämpömäärä  $Q$ , saadaan laskettua lämpötehon ja ajan avulla ja sen yleinen määritelmä kaavana on  $E = \Phi t$ . (Hirvelä ym. 2015, 246-249.)

### 3.7 Kriittinen lämpötila

Logistisista syistä kaasuja on helppo kuljettaa ja säilyttää nestemäisessä muodossa. Kaasumolekyylien välisten vuorovaikutusten ansiosta kaikki kaasut voidaan nesteyttää lämpötilaa alentamalla ja/tai painetta kasvattamalla. Kaasut eivät nesteydy niiden lämpötilan ylittäessä kriittisen lämpötilan rajan ja jokaisella kaasulla on oma rajansa tälle. Kriittisen lämpötilan yläpuolella hyvin voimakas lämpöliike estää kaasun molekyylien nesteytymisen, koska molekyylien välinen vetovoima ei pysty pitämään aineen koostumusta nesteenä. Alhainen kriittinen lämpötila on ominaista kaasuille, joilla on heikko koostumus ja molekyylien välinen vuorovaikutus. Esimerkiksi helium on tällainen kaasu ja se voi esiintyä nesteen olomuodossa hyvin alhaisessa lämpötilassa (-267 °C). Veden kriittinen lämpötila on korkea (374 °C) johtuen H<sub>2</sub>O-molekyylien voimakkaista vetysidoksista. (Antila ym. 2010, 44-45.)

## 4 INDUKTIO

Opetuslaitteistossa käytettävän induktiolämmittimen toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioilmiöön. Induktiolämmitin synnyttää magneettikentän laitteen kierukassa eli induktiosilmukassa, jossa kulkee sähkövirta. Sähkömagneettisen induktion kuvaamista varten täytyy selvittää magneettivuo -nimisen (tunnus  $\Phi$ ) suureen arvo, jolla kuvataan kenttäviivojen lukumäärää tietyn pinnan läpi. Kaava tähän on:

$$\Phi = B \cdot A \quad (32)$$

jossa magneettivuon tiheys  $B$  kuvaa kenttäviivojen lukumäärää pinta-alayksikköä ( $1 \text{ m}^2$ ) kohden kertaa kyseinen tietty pinta-ala  $A$ . (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2012, 36-37.)

Sähkömagneettinen induktio on ilmiö, jossa muuttuva magneettikenttä indusoi sähkövirtoja johdinsilmukkaan tai johtavaan kappaleeseen. Fyysikko ja kemisti Faraday totesi tämän havaitessaan, että muuttuva magneettikenttä indusoi sähkövirtoja metalliseen lankasilmukkaan. Tästä tulee nimi Faradayn laki ja se voidaan esittää kaavalla:

$$U = -(d/dt) \cdot \Phi \text{ tai } E = - (d\Phi/dt) \quad (33)$$

jossa muuttuva magneettivuo  $d\Phi$  lävistää metallisen silmukan ja indusoi jännitteen  $U/E$ , joka saa sähkövaraukset kiertämään silmukkaa. Mitä nopeammin magneettikenttä vaihtelee  $dt$ , sitä suuremman jännitteen se synnyttää. Magneettikenttä indusoi sähkökentän ja johtavuudesta riippuen se synnyttää sähkövirran. (Jokela & Nyberg 2006, 38.)

Sähkömagneettinen induktio soveltuu moniin käyttötarkoituksiin ja sitä käytetään sähköntuotannossa sähkögeneraattoreilla ja esimerkiksi induktioliesien toiminnassa. Induktion syntymisellä on eri tapoja, kuten itseinduktio ja keskinäisinduktio, ja niitä käsittelevissä luvuissa kerrotaan niille tyypillisiä tilanteita. (Laajalehto & Suvanto 2011, 165.) Tutkimuksessa induktioilmiö tulee esille pyörrevirtojen avulla ja sen käyttötarkoitus perustuu induktiolieden tapaan kohteen lämmittämiseen.

## 4.1 Itseinduktio

Itseinduktio on Faradayn ja Lenzin lain mukaan ilmiö, jossa muuttuva virta indusoi tätä muutosta vastustavan lähdejännitteen. Keskeistä siinä ovat virran muutokset hidastuvat silmukassa ja virtapiirissä. Indusoituneen lähdejännitteen kaava on Faradayn lain kaava:

$$E_L = - d\Phi/dt \quad (34)$$

jossa  $d\Phi$  on muuttuva magneettivuo ja  $dt$  on virran muutosnopeus ajassa ja Lenzin lain mukaan miinusmerkki on indusoituneen lähdejännitteen suunta eli napaisuus. Jännitteen napaisuus on sellainen, että jännite vastustaa magneettivuon muutosta, mikä aiheuttaa tämän jännitteen. Koska magneettikenttä on silmukassa kulkevan virran  $I$  aiheuttama, on silmukan läpi kulkevan magneettivuon tiheys suoraan verrannollinen virtaan. Magneettivuo  $\Phi$  on tämän perusteella myös suoraan verrannollinen silmukassa kulkevaan virtaan ja sen kaava on  $\Phi = LI$ . Kaavassa  $L$  on induktanssi, jonka yksikkö on  $Vs/A = H$ , henry. Induktanssin kaava on  $L = \Phi/I$ . (Peltonen ym. 2012, 38, 45.)

Kelat on tarkoitettu vastustamaan virran muutosta ja ne sisältävät induktanssia. Kelassa kulkee jokaisen silmukan läpi sama magneettivuo ja kaavan lisätään  $N$  kuvaamaan kelan kierrosten lukumäärää, jolloin induktanssin suuruus on  $L = N\Phi/I$ . Keloista käytetään myös nimitystä kuristin. Kaikissa virtapiireissä on jonkin verran induktanssia, mikä selittää esimerkiksi virran katkaisun aikana olevan viiveen. (Peltonen ym. 2012, 45.)

Keskinäisinduktiossa muuttuva virta toisessa kelassa indusoi toiseen kelaan jännitteen ja sama pätee induktiivisesti kytkettyihin piireihin. Keskinäisinduktanssissa kelassa 1 kulkevan virran  $I_1$  synnyttämä magneettikenttä aiheuttaa muutoksen kelan 2 sisällä, jolloin siihen indusoituu jännite. Kelat ovat silloin induktiivisesti kytketyt. Kelan 1 aiheuttama magneettivuo kelan 2 läpi on suoraan verrannollinen virtaan  $I_1$  eli sen kaava on  $\Phi = MI_1$ , jossa vakio  $M$  on keskinäisinduktanssi ja sen yksikkö on  $H$ , henry. Kelan 2 indusoitunut jännite on  $E_2 = -M \cdot (dI_1/dt)$ . Vastaavasti kelassa 2 muuttuva virta  $I_2$  indusoi Kelaan 1 jännitteen, jolloin verrannollisuuskerroin  $M$  ja keskinäisinduktanssi ovat samoja ja sen kaava on vastaavasti  $E_1 = -M \cdot (dI_2/dt)$ . (Peltonen ym. 2012, 50.)

## 4.2 Faradayn ja Lenzin laki

Magneettivuo saadaan sen tiheyden ja sen läpäisemän pinta-alan pistetulosta ja magneettivuo määritellään samalla tavalla kuin sähkövuolle, jonka tunnus on  $\Psi$ . Magneettivuon kaava on:

$$\Phi = B \cos \theta \quad (35)$$

jossa  $B$  on magneettivuon tiheys,  $A$  on magneettivuon läpäisemä pinta-ala ja  $\theta$  merkillä tarkoitetaan pinnan normaalin ja magneettivuon tiheyden välistä kulmaa. Magneettivuo-suureen yksikkö on  $T \cdot m^2 = V \cdot s = Wb$  eli voltitisekunti ja  $Wb$  on nimetty Weberin mukaan. Tämä kaava eroaa luvun alussa esitetystä magneettivuota kuvaavasta kaavasta siten, että silmukan läpi kulkeva magneettivuo ei ole kohtisuorassa magneettikenttää vastaan. (Peltonen ym. 2012, 37-38; Turun ammattikorkeakoulu 2019.)

Faradayn induktiolain mukaan silmukkaan indusoituu lähdejännite  $E$  siinä kulkevan magneettivuon muutoksen  $d\Phi$  seurauksena, ja sen suuruus on verrannollinen silmukan läpi kulkevan magneettivuon muutosnopeuteen  $dt$ . Induktiojännitteen suunta riippuu muutoksen suunnasta, jota kuvataan miinuksella ja kaava tälle on  $E = - (d\Phi/dt)$ . Esimerkiksi käämissä, joka voi myös olla kela, yhden silmukan sijasta käämin kaikkien silmukoiden läpi menevässä magneettivuossa tapahtuu sama muutos ja  $N$  silmukkaan jokaiseen indusoituu lähdejännite. Koska kaikissa silmukoissa tapahtuu sama muutos, siihen indusoituu Faradayn induktiolain yhtälön perusteella indusoitunut lähdejännite. Muutos saadaan silloin laskettua kaavalla  $E = -N (d\Phi/dt)$  ja  $N$  on silmukoiden kierrosten lukumäärä. Tämä laki ei aseta ehtoja sille, miten magneettivuon muutos tapahtuu. Käämin indusoitumiseen vaikuttavat magneettivuon tiheyden muutos, silmukan pinta-alan muutos, magneettikentän ja silmukan tason normaalin välisen kulman muutos tai näiden lueteltujen syiden yhdistelmä. Sähkögeneraattorin toiminta perustuu myös Faradayn lakiin. Generaattorin käämissä muutetaan mekaanista energiaa sähköenergiaksi magneettivuon muutoksen avulla ja muutos tapahtuu, kun käämiä pyöritetään tasaisessa magneettikentässä, jolloin käämin silmukoiden läpi kulkeva magneettivuo muuttuu jatkuvasti. (Inkinen, Manninen & Tuohi 2003, 167; Turun ammattikorkeakoulu 2019.)

Induktiovirta saadaan syntymään johdinsilmukassa, kun sen magneettikentän kenttäviivojen lukumäärä muuttuu. Kyseinen ilmiö onnistuu muuttamalla magneettivuon tiheyttä tai pinta-alaa johdinsilmukan kohdalla. Induktiovirran suunta saadaan selville Lenzin laista. Induktiovirta vastustaa muutosta, joka aiheuttaa induktiovirran. Esimerkiksi johdinsilmukassa aiheutetaan magneettikenttä vasemmalta, niin



induktiovirta vastustaa sieltä tulevaa muutosta. Induktiovirran suunnan ollessa positiivinen induktiojännite on positiivinen ja jännite on negatiivinen virran suunnan ollessa negatiivinen. (Laajalehto & Suvanto 2011, 167-171.)

### 4.3 Pyörrevirrat

Pyörrevirrat aiheutuvat magneettivuon muuttuessa ja pyörrevirtailmiö tapahtuu magneettivuon lävistäessä silmukan tai johtavan kappaleen, joka indusoi silmukkaan tai kappaleeseen lähdejännitteen. Indusoitumisesta syntynyt lähdejännite aiheuttaa sähkövirtoja, joita kutsutaan pyörrevirroiksi. Resistanssin ollessa pieni virrat voivat olla hyvinkin suuria, mikä aiheuttaa johtavan kappaleen lämpiämisen. (Turun ammattikorkeakoulu 2019.) Tutkimustyössä käytettävä kaasu voi olla esimerkiksi ilma, jonka lämmitysprosessi tehdään pyörrevirtojen avulla ja niitä syntyy induktiolämmittimen induktiosilmukassa.

Pyörrevirrat yrittävät Lenzin lain mukaisesti kumota muutoksen, joka aiheuttaa induktiovirran. Nopeasti muuttuvassa magneettikentässä johdekappaleeseen, esimerkiksi metalliin, indusoi pyörrevirtoja ja ne lämmittävät kappaletta. Sitä hyödynnetään teollisuusprosesseissa metallien sulatuksessa ja induktiokarkaisussa. Tätä sovelletaan myös arkielämässä ja induktioliedessä on merkityt paikat kattiloita ja pannuja varten. Paikkojen kohdalla on käämit lieden tason alla ja muuttuva magneettikenttä synnytetään käämiin suuritaajuisella vaihtovirralla. Käämin muuttuva magneettikenttä indusoi kattiloihin pyörrevirtoja, jolloin ne lämpenevät. (Laajalehto & Suvanto 2011, 182-183.)

Pyörrevirtoja voidaan hyödyntää teollisuudessa tai junien induktiojarruissa, mutta pyörrevirroilla on maine haitallisena ilmiönä. Erityisesti todellisissa muuntajissa tapahtuu tehohäviöitä pyörrevirtojen seurauksena resistanssien ja hystereesi-ilmiön lisäksi. Pyörrevirtoja voidaan vähentää rakentamalla muuntajat ohuista levyistä ja valmistamalla muuntajien magneettinen rautasydän toisistaan eristetyistä metallililiuskoista, sillä epäyhtenäiseen metallikappaleeseen ei voi syntyä suuria pyörrevirtasilmukoita. Tekeillä nämä toimenpiteet muuntajissa voidaan päästä yli 99% hyötysuhteeseen. Muuntajille on järjestettävä hyvä jäähdytys, koska pienikin hukateho aiheuttaa niiden lämpiämisen. (Laajalehto & Suvanto 2011, 183; Peltonen ym. 2012, 51.)

## 5 INDUKTIOLÄMMITIN

Tässä työssä kaasun lämmitysprosessi tapahtui käyttämällä induktiolämmitintä. Käyttötarkoituksessaan induktiolämmittimiä tai induktiokuumentimia käytetään teollisuusprosesseissa työvälineinä ja niiden pääasiallinen tehtävä on metallien kuumentaminen. Induktiokuumentimen periaatteessa teholähde syöttää virtaa induktiosilmukan läpi, ja virran synnyttämä magneettikenttä indusoi pyörrevirtoja johtavaan materiaaliin. (Jokela & Nyberg 2006, 391-392.) Induktiolämmitintä varten ei tarvita kovin suurta taajuutta tutkimuksessa, sillä kaasun lämmitys vaatii vähemmän energiaa kuin metallien kuumennus teollisuudessa. Se on myös helppokäyttöinen ja lämmittää kohteen nopeasti, minkä vuoksi se on hyödyllinen kaasun lämmittämisessä. Sekä termiä lämmitin että kuumennin voidaan käyttää vaihtokelpoisesti.

### 5.1 Induktiolämmittimen osat

Induktiolämmittimen tärkeimmät komponentit ovat teholähde, voimansiirtojohdot ja induktiosilmukka. Työssä lämmitettävä kaasu lämpiää tämän induktiosilmukan ympärillä. Lämmitettävä kohde (kaasu) lämpiää siinä olevista pyörrevirroista. Pyörrevirrat ovat lähtöisin magneettikentästä, joka on syntynyt virtasilman läpi kulkevasta suuresta sähkövirrasta. Energia muuntaa muotonsa tehohäviöiden seurauksena lämmöksi. Virtasilman koko ja muoto, virran suuruus ja käytettävä virran taajuus riippuvat kaikki työtehtävästä. (Jokela & Nyberg 2006, 391.)

Induktiokuumentimia käytetään sekä yksityis- että teollisuuskäytössä ja korjaustöissä esimerkiksi sen silmukassa syntyvän magneettikentän avulla pystytään irrottamaan jumiutuneet mutterit, laakerit ja pultit. Riippuen irrotuskohteesta sen kierukka on helposti vaihdettavissa ja sillä on helppo kohdistaa lämpö kohteeseen asettamalla kierukka metalliosan päälle tai ympärille. Laitteen hyötynä on erityisesti se, että se saa nopeasti aikaan korkean lämpötilan kappaleessa muutamissa sekunneissa. Lämmittimen laadusta riippuen huoneenlämmössä 10-22 mm:n kokoisen rautakappaleen kuumennusaika on välillä 25-35 sekuntia. Työkalun käytön turvalliseksi tekevä osa on ylikuumentumissuoja, jolla laite sammuu itsestään ylikuumentumisen sattuessa. (Puutila 2019.)



KUVA 3. Induktiolämmittimen osat (mukaiillen Puuilo 2020)

Kuvassa 3 on nähtävillä induktiolämmittimen osat ja käyttötarkoitukseen vaihdettavia silmukoita, jotka ovat nimeltään:

1. Suora induktiosilmukka 20 mm
2. Suora induktiosilmukka 37 mm
3. Litteä induktiosilmukka 55 mm
4. Taipuisa induktiosilmukka 830 mm
5. U-silmukka 430 mm
6. Integroitu työvalo
7. Käyttökytkin
8. Induktiosilmukan kiristysruuvit
9. Induktiolämmitin

## 5.2 Induktiolämmittimen turvallinen käyttö

Teollisuudessa käytettävien induktiokuumentimien synnyttämät kentät ovat teollisuudessa esiintyvistä kentistä voimakkaimpia ja työntekijät voivat altistua hyvin voimakkaille magneetikentille niitä käytettäessä. Työturvallisuuden vuoksi on määritelty etäisyydet, joissa on turvallista olla magneetikentän vaikutuksen alla. Magneetikentän voimakkuus yhden metrin päässä 10 kHz:n taajuudella toimivasta laitteesta on 30-500  $\mu\text{T}$ , ja magneettivuon tiheys lähestyy 5 milliteslaa kymmenen sentin päässä virtajohtimista. Toiminta-arvot työntekijöitä koskien 10 kHz:n taajuudella on 30,7  $\mu\text{T}$  ja 50 Hz:n taajuudella se on 500  $\mu\text{T}$ . (Jokela & Nyberg 2006, 392.) Teollisuudessa verrattaviin magneetikenttiin ei päästä työn laboratorioissa käytettävällä induktiolämmittimellä, joten tähän ei ole tarvetta varautua.

Työturvallisuus on tärkeä huomioida lämmitystä koskevissa prosesseissa ja tämän vuoksi induktiolämmitin on kaasun kuumentamista varten hyvä työkalu. Laite toimii sähkömagneettisesti, jossa kuumentaminen tapahtuu paikallisesti kierukassa induktiolla. Tämän vuoksi se ei lämmitä laitteen ulkoisia osia tai lämmitä mitään muuta, mikä on kierukan ulkopuolella. Induktiolämmitin ei myöskään aiheuta palovaa-  
raa tai palovamma riskiä työtilassa samoin kuin esimerkiksi kaasupolttimien käyttö voi aiheuttaa, joissa käytetään kaasupillää ja tulta kappaleen kuumentamiseen. Joissakin induktiolämmittimissä on automaattinen virrankatkaisu kahden minuutin yhtäjaksoisen käytön jälkeen ja ylikuumentumista estävä ohjattu jäähtyksen tuuletin. (Koneita 2019; Ursa Major 2020.)

## 6 MITTAAMINEN

Työn lämpötilan mittaamisessa kaksi kappaletta, joilla oli aluksi eri lämpötila, olivat kosketuksissa keskenään ja kappaleet saavuttivat saman loppulämpötilan lämpötilaerojen tasoituttua. Lämpömittari näytti oman lämpötilansa ja mittauskohteen lämpötilan, joka oli työssä käytetty kaasu. Kappaleet saavuttivat termisen tasapainon, ja ilmiö määriteltiin lämpötilaa käsittelevän luvun alussa. (Inkinen & Tuohi 2002, 353; Suvanto 2003, 401.)

Lämpötilaa voidaan mitata monilla eri menetelmillä, mutta kokeelliseksi lämpötilan määrittystavan ehdoksi riittää se, että kuumemmasta kappaleesta virtaa lämpöä kylmempään kappaleeseen. Kuumemmassa kappaleessa tapahtuu lämpötilan aleneminen ja kylmemmässä kappaleessa lämpötilan kohoaminen lämmönsiirron aikana. (Lampinen 2013, 88; Suvanto 2003, 401.)

### 6.1 Mihin mittauksia tarvitaan

Lämpötilan mittauksia varten on olemassa monia erilaisia lämpömittareita ja ne eroavat toisistaan mittaustavoiltaan, ominaisuuksiltaan ja niille tarkoitetuista mittauskohteista. Nämä kaikki tekijät vaikuttavat tutkimuksen mittausprosessiin kuuluvan lämpömittarien valintaan. Työ on hyödyllinen siksi, koska lämpötilaa mitataan kaikkialla ja se on tärkeä suure. Erityisesti teollisuudessa lämpötilaa tarkkaillaan lukuisissa prosesseissa. Tutkimuksessa on mahdollista myös mitata ja ottaa ylös kaasun virtausnopeudet, induktiolämmittimen taajuudet ja energian kulutus. (Pihkala 2004, 35.) Korkeiden lämpötilojen tutkimista varten hyviä mittareita ovat esimerkiksi optinen pyrometri, infrapunalämpömittari ja infrapunalämpökamera.

Lämpötilan mittaaminen perustuu siihen, että kosketuksissaan olevat kappaleet saavuttavat saman lämpötilan eli termodynaamisen tasapainotilan. Lämpömittari ilmoittaa mittauksessa oman lämpötilansa ja se on sama mitattavalla kappaleella. Tästä käytetään nimitystä termodynamiikan nollas pääsääntö, jonka mukaan lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan ja lämpötilaero on lämpöenergian paikasta siirtymistä toiseen systeemissä, kuten kosketuksissa olevat kappaleet, kunnes ne saavuttavat tasapainotilan. Erilaiset siirtymistä ajavat voimat ovat kuljetusilmiöissä tärkeitä ja jokaiselle asialle on syy siihen tässä prosessissa, miksi molekyylit tai lämpö liikkuvat. (Hautala & Peltonen 2005, 188.)

## 6.2 Mittausmenetelmät

Tässä työssä käytettävän mittarin olisi oltava sellainen, joka kestää hyvin korkeita lämpötiloja. Lämpökameran sen sijaan ei tarvitse olla kosketuksissa mitattavaan kaasuun. Työntarkoituksena on saada kaasun lämpötila korkeaksi nopeasti ja ottaa ylös mahdollisimman tarkat tulokset. Käytännössä lämpötilamittaustapojen suunnittelu ja toteuttaminen on vaikeaa silloin, jos halutaan mitata prosessissa nopeasti muuttuvia lämpötiloja. Lampinen (2013, 88) mainitsee teoksessaan, että se ei ole mahdotonta, mutta tarkkaa tulosta ei saada helposti.

Lämpötilan mittaaminen on yleensä hidasta, sillä siinä pitää odottaa mittausvälineen lämpötilan tasaantumista kohteen lämpötilaan ennen varsinaista mittausta. Digitaalinäytöllä varustettu mittari tulee kytkeä päälle hyvissä ajoin ennen mittausta, jotta lämpötila siinä ehtii tasaantua, koska mittausvirta lämmittää mittaria. (Pihkala 2004, 36.) Toisin sanoen oli mittausten menetelmä mikä tahansa, tulee siinä tarkoin perehtyä ennakkoon mittarin käyttöohjeisiin ja mittaustuloksiin vaikuttaviin ulkoisiin tekijöihin. Karsimalla mittausta häiritsevät tekijät pois saadaan laadukkaampia ja tarkempia tuloksia.

## 7 TURVALLISUUS

Korkeiden lämpötilojen ja sähkölaitteiston sisältävien riskien vuoksi on oleellista, että tutkimusympäristö ja laitteen käyttö on turvallista. Käytännöntyö tehdään ohjaajan valvonnan alla, joka antaa luvan työn aloittamiselle ja seuraa työn etenemistä. Onnettomuuksien ennaltaehkäisyyn avulla pystytään pienentämään mahdollisia riskejä, kuten tulipalonvaara tai loukkaantuminen. Oikeanlaisten laitteiden käyttö on tärkeää, sillä laitteen hajoaminen vääränlaisessa olosuhteessa tämän tyyppisessä tehtävässä voi aiheuttaa vaaratilanteen. Mittaustavasta riippuen lämpömittarin on kestävä korkeita lämpötiloja. Laitteen kunto tulee myös tarkastaa ennen käyttöönottoa, sillä jos induktiolämmittimen eristyksessä on vikaa, se voi johtaa kipinöintiin. Kuuma kaasu on jäähdytettävä nopeasti ja sitä varten on olemassa kaavoja, joilla saadaan laskettua tarvittava jäähdytysteho.

### 7.1 Jäähdytysprosesseja

Kaasun lämpötilat tutkimuksessa saavuttaa hyvin korkean lämpötilan ja siksi on mietittävä keinoja niiden jäähdyttämistä varten. Kaasun lämpötila laskee esimerkiksi tehtäessä työtä paisunnan yhteydessä ja suurin työ ja suurin lämpötilan lasku saadaan häviöttömässä, isentrooppisessa paisunnassa. Yksi tapa jäähdyttää kaasua tapahtuu sen virratessa tangentiaalisesti suurella nopeudella putkeen, jossa on kuristuslaippa. Tässä ilmiössä ilma jakaantuu lämpimään ja kylmään virtaukseen, mikä tapahtuu pyörteiden välityksellä. Otettaessa ilmaa keskeltä laipan reiän kautta paisuu kehältä siirtyvä ilma jäähtyen ja luovuttaen työtä reunoilla. Tällä menetelmällä suurin lämpötilan aleneminen tapahtuu silloin, kun kylmä virtaus on 25-30% kokonaisilmamäärästä. Edellisen esimerkin tavoin kaasun toinen painevaihtelulla tapahtuva jäähdytys toteutetaan pulsaatioputkella. Putkessa syntyvän paineaallon seurauksena toisessa päässä tapahtuvassa puristuksessa vapautuu lämpöä ja toisen pään paisunnassa kaasu vuorostaan jäähtyy. Akustinen jäähdytys muistuttaa pulsaatioputkimenetelmää. Putkeen aiheutetaan kaiuttimella ja Helmholtzin resonaattorilla seisova paineaalto, jonka toinen solmu jäähtyy ja toinen lämpiää. (Aittomäki 2012, 58-60.)

Kaasukiertoprosesseissa Brayton-prosessi ja Stirling-prosessi ovat tärkeimmät ”normaalin” lämpötila-alueen jäähdytyskäytössä olevat prosessit. Brayton-prosessissa kompressorissa tapahtuvassa isentrooppisessa puristuksessa poistetaan lämpöä vakioaineessa. Jäähtynyt kaasu paisuu isentrooppisesti ja jääh-

tyy edelleen paisuntakoneessa. Stirling-prosessia käytetään enemmän hyvin matalissa lämpötiloissa, joten sen teoria ei soveltunut tähän työhön hyvin. Se koostuu kuitenkin isotermisestä puristuksesta, isokoorisesta lämmön poistosta, isotermisestä paisunnasta ja isokoorisesta lämmityksestä. On olemassa myös Gifford/McMahon-menetelmä, jossa jäädytys, regeneraattori ja puristus ovat erotettuja paisuntasylinterin yhteydestä. Tämä prosessi perustuu männän liikkeeseen, joka vaikuttaa kaasun virtaukseen. (Aittomäki 2012, 61-64.)

## 7.2 Jäähdytystehon laskenta

Lämpömäärä eli lämpöenergia  $Q$  kuvaa kappaleen molekyylien liike-energioiden summan ja sen avulla saadaan tietoa siitä, kuinka paljon lämpöenergiaa on poistettava jäädytettävästä kohteesta ja se on riippuvainen aina massasta. Yksinkertaisesti sanottuna toisessa saman lämpöisessä ja samaa ainetta olevassa kappaleessa, jossa on kaksinkertainen massa, on kaksinkertainen määrä lämpöä eli lämpömäärää. Tiettyyn aikaan sidottua lämpöenergian muutosta kuvataan tehon suureella  $P$ , jonka yksikkö on watti (W). Toteuttaakseen yhden joulen suuruisen lämpöenergian lisäyksen sekunnissa siihen on vietävä watin suuruisen lämmitysteho ja sen kaava on  $1\text{J}/1\text{s} = 1\text{W}$ . Tämä periaate toimii myös jäädyttämisessä, missä tietty teho on käytettävä lämpöenergian siirtämiseksi pois tietyssä ajassa. (Hirvelä ym. 2015, 10.)

Jäähdytykseen tarvittava energian poisto tai lämmitykseen tuotava energia saadaan selville ominaislämpökapasiteetista  $c$ . Ominaislämpökapasiteetti kertoo tarvittavan lämpöenergian suuruuden, jotta kilo ainetta lämpenee yhden asteen verran ja vastaavasti saman suuruisen lämpöenergia on siirrettävä pois, jotta aine jäähtyisi. Ominaislämpökapasiteetin avulla voidaan laskea, paljonko tarvitaan lämpöenergiaa  $Q$  lämmitysprosessissa, jotta tietyn painoinen kappale  $m$  lämpenee tietyn lämpötilaeron  $\Delta T$  verran ja sen kaava on  $Q = cm\Delta T$ . Tarvittava teho saadaan selville kaavalla:

$$P = c\dot{m}\Delta T \tag{36}$$

jossa  $\dot{m}$  on massavirta  $\text{kg/s}$ . Lämpömäärän kaavan ja tehon kaavan avulla pystytään laskemaan tutkittavan kaasun jäädytystehon tarve. Tutkimuksessa käytetyn ilman ominaislämpökapasiteetti todettiin aikaisemmin olevan  $1 \text{ kJ/kg K}$  ja kuutio ilmaa painaa n.  $1,2 \text{ kg}$ , koska ilmaa mitataan tavallisesti kuutioissa. (Hirvelä ym. 2015, 10-11.)



## 8 POHDINTA

Integrointilaskennan avulla on helppo laskemalla arvioida ominaislämpökapasiteetti taulukoista saatujen kaasun arvojen ja lämpötilan avulla. Työssä tehty tutkinta sopii laboratorioharjoitukseksi fysiikan- sekä energialaboratorioihin. Käytännön merkitystä tällä on, kun lasketaan esimerkiksi kaasutusprosessin hyötysuhdetta. Työssä saaduista tuloksista voi päätellä, että siitä tulee merkittävästi tarkemmat tulokset kaasutusprosessin hyötysuhteesta tällä mallilla verrattuna oletukseen lineaarisesta ominaislämpökapasiteetista tietyllä lämpötilavälillä. Tuloksien perusteella voidaan tulla siihen johtopäätökseen, että ne ovat hyödyllisiä käytännönkin kannalta.

Uuden koronaviruksen aiheuttaman poikkeustilan seurauksena työssä ei päästy tekemään käytännön osuutta, mutta viivakaavioiden avulla pystyi havainnollistamaan sen, että ominaislämpökapasiteetilla on lämpötilariippuvuutta. Laitteiston komponentteihin tutustuminen oli kuitenkin mahdollista laboratoriossa ja siitä kävi ilmi, että työvaiheiden toimintaperiaate on helppo toteuttaa. Kaasun kuumentaminen induktiolämmittimellä on yksinkertaista, mutta virtausmittarin ohjeisiin tarvitsee kuitenkin perehtyä tarkemmin ja sitä varten on olemassa manuaali. Mittaustuloksien dokumentoinnin sijasta lämpötilat piti valita mielivaltaisesti, mutta ne ovat kuitenkin verrattavissa kokeellisiin tuloksiin.

Tutustuessani materiaaliin lämmön tutkimisessa haasteena oli selvittää, mitkä asiat olisivat tarpeellisia, sillä lämpö on hyvin laaja käsite. Esimerkiksi lämmön siirtymisessä hyvin moni asia liittyy toisiinsa, kuten säteilyn seurauksena johtuminen. Opetuslaitteiston asentamista ja suunnittelua varten oli ennen kaikkea selvitettävä, mitkä asiat ovat vuorovaikutuksessa keskenään toisiinsa.

Sähköinsinöörin tutkintoa varten minusta oli oleellisinta tutkia, miten otetaan käyttöön mittaustuloksia varten laboratorioon opetusväline ja selittää sen avulla tehtävät työt teoriassa. Induktioilmiöllä tapahtuvan työprosessin avulla voisi lämmittää muitakin aineita kuin kaasua, esimerkiksi kiinteitä materiaaleja. Tämä ei kuitenkaan muuttaisi opinnäytetyön tarkoitusta suuresti, mutta se vaatisi toisenlaiset mittaamenetelmät ja vakiot. Idean aiheen valitsemiselle oli se, että olin opiskelujen aikana aina kiinnostunut kaikesta mittaukseen liittyvästä. Tämä tutkimustyö antoi minulle hyvät eväät työelämään ja halusin tehdä sen nimenomaan tästä aiheesta, sillä olen kiinnostunut energia-alasta ja työskentelystä lämpövoimalaitoksessa.

Olin säännöllisesti yhteydessä ohjaajaan ja työelämänohjaajaan prosessin aikana ja raportoin heille aktiivisesti työni edistymisestä, mikä puolestaan auttoi minua työn hahmottamisessa ja tavoitteiden selkeästä rajaamisesta. Puolivälissä tutkimusta käytiin keskustelua yhden kokonaisen konseptin jättämisestä tutkimuksesta, mutta työn tarkoitusperä pysyi samanlaisena muutoksista huolimatta. Minulla oli tapana jokaisesta tapaamisesta kirjoittaa ylös muistio ja se osoittautui hyödylliseksi tavaksi saada asiat tehtyä aikataulun mukaan.

## LÄHTEET

Aittomäki, A. 2012. Kylmäteknikka 4. painos. Porvoo: Bookwell Oy.

Antila, A-M., Karppinen, M., Leskelä, M., Mölsä, H.& Pohjakallio, M. 2010. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita Prima Oy.

Hautala, M.& Peltonen, H. 2005. Insinöörin (AMK) fysiikka osa 1. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy.

Hautala, M.& Peltonen, H. 2016. Insinöörin (AMK) fysiikka osa 1. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy.

Hirvelä, A., Jokela, M., Kaappola, E.& Kianta, J. 2015. Kylmäteknikan perusteet. Helsinki: Next Print Oy.

Ideal-gas specific heats of various common gases (Continued). 2020. Chegg Study. Saatavissa: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/power-output-turbine-determined-turbine-utilises-air-working-fluid-well-insulated-consider-q5822709>. Viitattu 11.5.2020.

Incropera, F.P.& DeWitt, D.P. 1990. Fundamentals of heat and mass transfer. NY: Wiley.

Inkinen, P., Manninen, R.& Tuohi, J. 2003. Momentti 2 Insinöörifysiikka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

Inkinen, P.& Tuohi, J. 2002. Momentti 1 Insinöörifysiikka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

Jokela, K.& Nyberg, H. 2006. Sähkömagneettiset kentät. Hämeenlinna: Karisto Oy:n kirjapaino.

Koneita. Nova IL1000 - Induktiolämmitin 1kw. Saatavissa: [https://www.koneita.com/induktiolammitimet/IL1000\\_induktiolammitin.htm](https://www.koneita.com/induktiolammitimet/IL1000_induktiolammitin.htm). Viitattu 12.10.2019.

Laajalehto, K.& Suvanto, K. 2011. Tekniikan fysiikka 2. Helsinki: Edita Prima Oy.

Lampinen, M. 2013. Termodynamiikan perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.

Lampinen, M., Kotiaho, V.& Seppälä, A. 2007. Termodynamiikan perusteet, johdatus lämmönsiirtoon, laskuharjoitustehtäviä ratkaisuihin. Otaniemi: Edita Prima Oy.

Paakkari, T. 1997. Termofysiikka. Helsinki: Limes ry.

Peltonen, H., Perkkiö, J.& Vierinen, K. 2012. Insinöörin (AMK) fysiikka osa II. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy.

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. Vantaa: Dark Oy.

Puuiilo. Kramfors Induktiokuumennin käyttöohje. Saatavissa: [https://www.puuiilo.fi/WebRoot/Puuiilo/Shops/2014011303/5BA5/3FBA/7147/F7A9/0BB7/0A28/1058/51A1/Kramfors\\_induktiokuumennin\\_1000W\\_manual\\_FIN.pdf](https://www.puuiilo.fi/WebRoot/Puuiilo/Shops/2014011303/5BA5/3FBA/7147/F7A9/0BB7/0A28/1058/51A1/Kramfors_induktiokuumennin_1000W_manual_FIN.pdf). Viitattu 18.12.2019.

Suvanto, K. 2003. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita Prima Oy.

Turun ammattikorkeakoulu. 4. Sähkömagneettinen induktio. Saatavissa: [http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/SahMag/2\\_4\\_Induktio.pdf](http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/SahMag/2_4_Induktio.pdf). Viitattu 3.1.8.2019.

Ursa Major. Induktiokuumentimet. Saatavissa: <http://www.ursamajor.fi/verkkokauppa/index.php?route=product/category&path=61>. Viitattu 22.2.2020.

Wagner, W. 1994. Lämmönsiirto. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Wikstén, R. 1998. Lämpövoimaproessit. Helsinki: Hakapaino.