

Sami Antero Yrjänheikki

sami.a.yrjanheikki@student.jyu.fi

14.5.1999

# FYSP1081/4 Kaasututkimus

Työ mitattu: 22.3.2019

Ohjaava assistentti: Victoria Särkioja

Työ jätetty tarkastettavaksi:

## **Abstract:**

In this laboratory exercise the density of dry air was determined using the density of moist room air. Density of moist air was  $\rho = (1.182 \pm 0.015) \text{ g/m}^3$  and the density of dry air was determined to be  $\rho_i = (1.184 \pm 0.015) \text{ g/m}^3$ . Corresponding density in NTP conditions was  $\rho_{NTP} = (1.282 \pm 0.037) \text{ g/m}^3$ , which is in agreement with a literature value of  $1.293 \text{ g/m}^3$ .



# 1 Johdanto

Tässä työssä selvitetään kuivan ilman tiheys lasipullon ja tyhjiöpumpun avulla. Lasipulloon pumpataan tyhjiö ja pullon massa punnitaan. Tämän jälkeen pulloon päästetään pieni määrä ilmaa, jonka jälkeen pullo punnitaan uudelleen. Mittaustuloksista määritetään pullossa olevan ilman massa ja siten sen tiheys.

Toisin kuin yleensä, tässä työssä huomioidaan myös vesihöyryn vaikutus ilman tiheyteen. Mitattu ilman tiheys ei ole suoraan vertailukelpoinen kirjallisuusarvoihin, koska huoneen ilmankosteus vaikuttaa tiheyden arvoon. Mittaamalla huoneen suhteellinen kosteus, lämpötila ja ilmanpaine, voidaan ideaalikaasulain avulla selvittää vastaavan kuivan ilman tiheys. Kun tämä tiheys vielä normitetaan NTP-olosuhteisiin, voidaan saatua arvoa verrata kirjallisuusarvoihin.

## 2 Teoreettiset lähtökohdat

### 2.1 Ideaalikaasu

Ideaalikaasu koostuu hyvin pienistä, kovista ja pallomaisista atomeista tai molekyyleistä. Nämä kaasun rakenneosat vuorovaikuttavat vain nopeiden ja täysin elastisten törmäysten kautta joko toistensa tai seinien kanssa. Monia kaasuja, kuten tämän työn kosteaa ilmaa, voidaan mallintaa ideaalikaasuna. Ideaalikaasumalli on hyvä approksimaatio reaalikaasusta, kun kaasun tiheys on alhainen eli rakenneosien kokonaistilavuus on paljon kaasun kokonaistilavuutta pienempi ja lämpötila on reilusti yli kastepisteen. [1, s. 512]

Ideaalikaasulle pätee yleisesti tilanyhtälö

$$pV = nRT, \tag{2.1.1}$$

missä  $p$  on kaasun paine,  $V$  tilavuus,  $n$  ainemäärä,  $T$  lämpötila ja  $R$  kaasuvakio ( $R = 8,314 \text{ J/molK}$ ) [1, s. 522]. Yhtälölle (2.1.1) saadaan ekvivalentti muoto

$$\frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} = \rho \quad (2.1.2)$$

käyttämällä kaavaa  $n = m/M$ , missä  $m$  on kaasun massa,  $M$  moolimassa ja  $\rho$  tiheys [1, s. 516].

## 2.2 Kostean ilman tiheys

Kuiva ilma on useiden kaasujen seos, missä kaasujen keskinäiset suhteet ovat hyvin lähellä vakioita. Kostea ilma voidaan siten ajatella kuivan ilman ja vesihöyryn seoksena. Merkitään kuivan ilman tiheyttä  $\rho_i$  ja massaa  $m_i$  sekä kostean ilman tiheyttä  $\rho$  ja massaa  $m'$ . Oletetaan lisäksi, että näiden kaasujen tilavuus  $V$  on sama. Tällöin tiheyksien suhteeksi saadaan

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \frac{m'/V}{m_i/V} = \frac{m'}{m_i}. \quad (2.2.1)$$

Toisaalta kostean ilman massa koostuu kuivan ilman massasta  $m'_i$  ja vesihöyryn massasta  $m_v$ . Yhtälö (2.2.1) saadaan nyt yhtälön (2.1.2) avulla muotoon

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \frac{m'_i + m_v}{m_i} = \frac{\frac{p'_i V M_i}{RT} + \frac{e V M_v}{RT}}{\frac{p V M_i}{RT}} = \frac{p'_i M_i + e M_v}{p M_i}, \quad (2.2.2)$$

missä  $p'_i$  on kuivan ilman paine,  $M_i$  kuivan ilman moolimassa,  $e$  vesihöyryn paine ja  $p$  ilman kokonaispaine. Osapainelain mukaan ilman kokonaispaineelle pätee  $p = p'_i + e$ , jolloin yhtälöstä (2.2.2) saadaan

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \frac{(p - e)M_i + eM_v}{pM_i} = 1 - \frac{M_i - M_v}{M_i} \frac{e}{p}. \quad (2.2.3)$$

Yhtälössä (2.2.3) termi  $\frac{M_i - M_v}{M_i}$  on ilman ja veden moolimassoista riippuva vakio, joten merkitään  $\tilde{M} \equiv \frac{M_i - M_v}{M_i}$ . Tällöin tiheyksien suhde (2.2.3) saadaan muotoon

$$\frac{\rho}{\rho_i} = 1 - \tilde{M} \frac{e}{p}. \quad (2.2.4)$$

Ilman suhteellinen kosteus  $f$  voidaan ilmaista vesihöyryn osapaineen  $e$  ja kyllästymispaineen  $e_m$  avulla siten, että

$$f = \frac{e}{e_m} \iff e = f e_m. \quad (2.2.5)$$

Sijoittamalla yhtälö (2.2.5) yhtälöön (2.2.4) ja ratkaisemalla  $\rho_i$  saadaan

$$\frac{\rho}{\rho_i} = 1 - \tilde{M} \frac{f e_m}{p} \iff \rho_i = \frac{\rho p}{p - f e_m \tilde{M}}. \quad (2.2.6)$$

Yhtälön (2.2.6) suureiden voidaan olettaa olevan riippumattomia, joten virhearviointiin voidaan soveltaa virheen yleistä etenemislakia. Oletetaan, että ilman ja veden moolimassoilla ei ole virhettä eli  $\delta \tilde{M} = 0$ . Osittaisderivaatoiksi saadaan tällöin

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial \rho} &= \frac{p}{p - f e_m \tilde{M}} \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial p} &= \frac{\rho}{p - f e_m \tilde{M}} - \frac{\rho p}{(p - f e_m \tilde{M})^2} \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial f} &= \frac{\rho p e \tilde{M}}{(p - f e_m \tilde{M})^2} \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial e_m} &= \frac{\rho p f \tilde{M}}{(p - f e_m \tilde{M})^2}, \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

jolloin virhelausekkeeksi tulee

$$\begin{aligned}\delta\rho &= \sqrt{\left(\frac{\partial\rho_i}{\partial\rho}\delta\rho\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho_i}{\partial p}\delta p\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho_i}{\partial f}\delta f\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho_i}{\partial e_m}\delta e_m\right)^2} \\ &= \frac{\sqrt{(\delta\rho)^2 p^2 (p - fe_m\tilde{M})^2 + \rho^2\tilde{M}^2 (f^2 e_m^2 (\delta p)^2 + p^2 (e_m^2 (\delta f)^2 + f^2 (\delta e_m)^2))}}{(p - fe_m\tilde{M})^2}.\end{aligned}\tag{2.2.8}$$

[2, s. 75].

### 2.3 Sumun muodostuminen

Sumu koostuu ilmassa olevista vesipisaroista. Kun näitä pisaroita on tarpeeksi ilmassa, näkyvyys heikkenee ja havaitaan ilmassa leijuvaa sumua. Sumu siis syntyy, kun ilman vesihöyry alkaa tiivistymään vedeksi. Tiivistyminen voi tapahtua esimerkiksi silloin, kun ilman lämpötila laskee. Toisaalta, jos ilmassa olevan vesihöyryn määrä lähestyy maksimikosteutta (tai ylittää sen), ilmasta tulee (yli)kylläistä, jolloin pienenkin kosteuden lisääminen ilmaan pakottaa osan vesihöyrystä tiivistymään.

## 3 Mittauslaitteisto ja kokeelliset menetelmät

Varsinainen mittauslaitteisto koostui tyhjiöpumpusta (2 Stages Vacuum Pump, 2SYF-1B) ja painemittarista (Digitron 2022P). Alun perin käytössä ollut painemittari (Digitron P200M) lakkasi toimimasta mittauksen alussa, joten se vaihdettiin uuteen, edellä mainittuun mittariin. Kaikki mittaukset on tehty uudella painemittarilla. Pullon punnitsemiseen käytettiin Ohaus Balance PA224C -digitaalivaakaa. Lisäksi huoneen lämpötila ja suhteellinen ilman-

kosteus luettiin Testo 608-H1 -hygrometrillä. Vallitseva ilmanpaine luettiin Leybold 317 13 Baur 2 -barometrilla.

Mittauksen alussa lasipulloon pumpattiin tyhjiöpumpulla tyhjiö, jonka jälkeen sen massa punnittiin vaa'alla. Tämän jälkeen toistettiin sykliä, jossa pulloon päästettiin hieman ilmaa varovasti venttiiliä raottamalla, mittaamalla pullon ja huoneilman välinen paine-ero kytkemällä pullo letkulla painemittariin sekä lopuksi punnitsemalla pullo vaa'alla. Sykliä toistettiin aina vallitsevaan ilmanpaineeseen asti.

Sama mittaus toistettiin kahdesti, missä ensimmäiseen mittaussarjaan tuli 12 mittauspistettä ja toiseen 14 pistettä. Mittaus toistettiin kahdesti, sillä ensimmäisen mittauksen alussa ilmaa pääsi pulloon hieman liikaa, mutta tulokset olivat muuten täysin kelpoisia.

## 4 Havainnot ja laskut

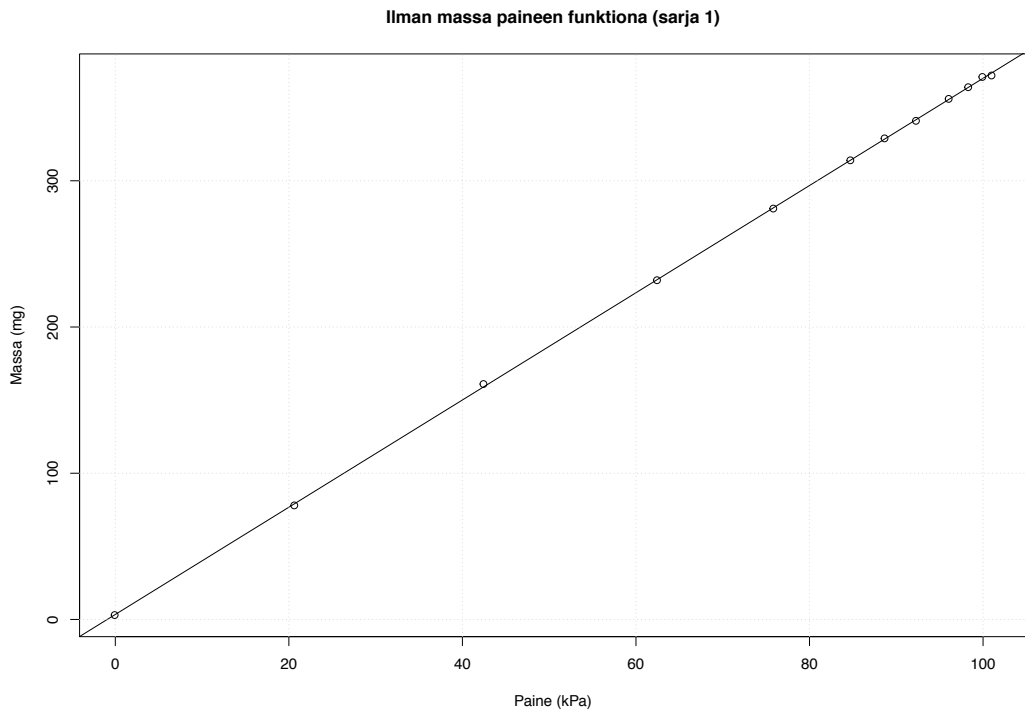
Pullon paine-eron ja massan mittaustulokset on esitetty taulukossa 2 (Liite 1). Lasipullon ja liittimien yhteistilavuudeksi oli annettu valmiiksi  $V = (315 \pm 3)$  ml. Huoneen lämpötila heti mittausten jälkeen oli  $T = (21,3 \pm 0,3)$  °C, suhteellinen ilmankosteus  $f = (16,7 \pm 0,2)$  % ja ilmanpaine  $p_i = (757 \pm 2)$  mmHg =  $(100,9 \pm 0,2)$  kPa.

### 4.1 Pullon paine

Mitattu paine on vallitsevan ilmanpaineen ja pullossa olevan paineen ero, joten pullon absoluuttinen paine saadaan vähentämällä ilmanpaineesta pullon paine eli  $p = p_i - \Delta p$ . Pullossa oleva ilman massa saadaan puolestaan vähentämällä mitatusta massasta pullon massa silloin, kun pullossa on tyhjiö eli  $m = m_p - m_t$ . Taulukon 2 perusteella pelkän pullon massa  $m_t = (194,941 \pm 0,001)$  g.

Taulukko 1:  $m(p)$ -suorasovituksen parametrit

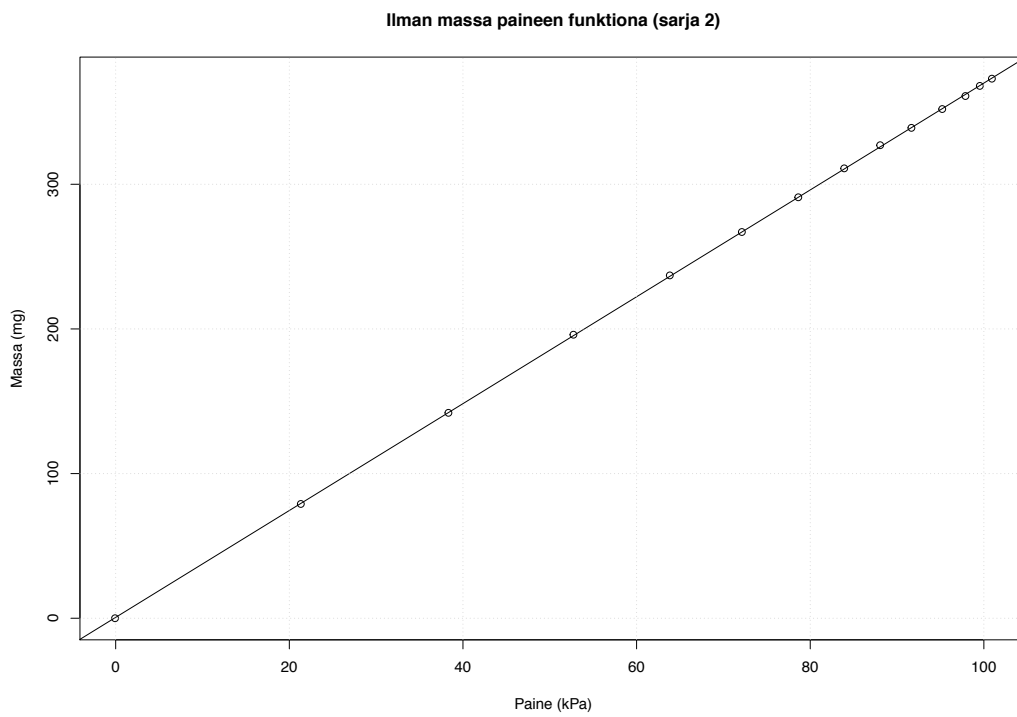
| Sarja | $A$ (kg/Pa)                           | $B$ (kg)                          |
|-------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1     | $(3668,89 \pm 10,17) \times 10^{-12}$ | $(33,32 \pm 5,57) \times 10^{-7}$ |
| 2     | $(3699,71 \pm 3,85) \times 10^{-12}$  | $(3,43 \pm 2,20) \times 10^{-7}$  |



Kuva 1:  $m(p)$ -suorasovitus mittaussarjalle 1

Kuvissa 1 ja 2 on esitetty edellisen kappaleen tavalla muokatun datan  $m(p)$ -suorasovitus. Näitä sovituksia  $m = Ap + B$  vastaavien parametrien  $A$  ja  $B$  arvot ovat esitetty taulukossa 1. Suorasovitukseen on käytetty R-ohjelmointikielen painotettua PNS-sovitusta, jossa painoina on käytetty neliöllisesti yhdistettyjä paineen ja massan virheitä.





Kuva 2:  $m(p)$ -suorasovitus mittausarjalle 2

## 4.2 Ilman massa

Pullossa olevan ilman massa saadaan nyt suorasovitukselta siten, että  $m_i = A_n p_i$ , missä  $m_i$  on ilman massa,  $A_n$   $n$ :nnen mittaussarjan suorasovitusparametri ja  $p_i$  vallitseva ilmanpaine. Ensimmäisen mittaussarjan ilman massaksi tulee

$$\begin{aligned} m_{i,1} &= A_1 p_i \\ &= 3668,89 \times 10^{-12} \text{ kg/Pa} \cdot 100,9 \times 10^3 \text{ Pa} \\ &\approx 370,19 \text{ } \mu\text{g} \end{aligned} \tag{4.2.1}$$

ja vastaavasti toisen sarjan ilman massaksi saadaan

$$\begin{aligned} m_{i,2} &= A_2 p_i \\ &= 3699,71 \times 10^{-12} \text{ kg/Pa} \cdot 100,9 \times 10^3 \text{ Pa} \\ &\approx 373,30 \text{ } \mu\text{g}. \end{aligned} \tag{4.2.2}$$

Virherajat saadaan maksimi-minimikeinolla siten, että

$$\frac{\delta m_i}{m_i} = \frac{\delta A}{A} + \frac{\delta p_i}{p_i} \iff \delta m_i = m_i \left( \frac{\delta A}{A} + \frac{\delta p_i}{p_i} \right). \tag{4.2.3}$$

Sijoittamalla lukuarvot yhtälöön (4.2.3) saadaan ensimmäiselle mittaussarjalle ilman massa virheeksi

$$\begin{aligned}
\delta m_{i,1} &= m_{i,1} \left( \frac{\delta A_1}{A_1} + \frac{\delta p_i}{p_i} \right) \\
&= 370,19 \times 10^{-9} \text{ kg} \left( \frac{10,17 \times 10^{-12} \text{ kg/Pa}}{3668,89 \times 10^{-12} \text{ kg/Pa}} + \frac{0,2 \text{ kPa}}{100,9 \text{ kPa}} \right) \\
&\approx 1,76 \text{ } \mu\text{g}
\end{aligned} \tag{4.2.4}$$

ja toiselle mittaussarjalle

$$\begin{aligned}
\delta m_{i,2} &= m_{i,2} \left( \frac{\delta A_2}{A_2} + \frac{\delta p_i}{p_i} \right) \\
&= 373,30 \times 10^{-9} \text{ kg} \left( \frac{3,43 \times 10^{-12} \text{ kg/Pa}}{3699,71 \times 10^{-12} \text{ kg/Pa}} + \frac{0,2 \text{ kPa}}{100,9 \text{ kPa}} \right) \\
&\approx 1,09 \text{ } \mu\text{g}.
\end{aligned} \tag{4.2.5}$$

Molemmissa mittaussarjoissa saadut ilman massat sisältyvät lähes toistensa virherajoihin, joten tulokset voidaan yhdistää. Käyttämällä painotettua keskiarvoa saadaan ilman massaksi

$$\begin{aligned}
m' &= \frac{\frac{m_{i,1}}{(\delta m_{i,1})^2} + \frac{m_{i,2}}{(\delta m_{i,2})^2}}{\frac{1}{(\delta m_{i,1})^2} + \frac{1}{(\delta m_{i,2})^2}} \\
&= \frac{\frac{370,19 \text{ } \mu\text{g}}{(1,76 \text{ } \mu\text{g})^2} + \frac{373,30 \text{ } \mu\text{g}}{(1,09 \text{ } \mu\text{g})^2}}{\frac{1}{(1,76 \text{ } \mu\text{g})^2} + \frac{1}{(1,09 \text{ } \mu\text{g})^2}} \\
&= 372,44 \text{ } \mu\text{g}
\end{aligned} \tag{4.2.6}$$

ja virheeksi

$$\begin{aligned}
\delta m' &= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\delta m_{i,1})^2} + \frac{1}{(\delta m_{i,2})^2}}} \\
&= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(1,76 \mu\text{g})^2} + \frac{1}{(1,09 \mu\text{g})^2}}} \\
&\approx 0,93 \mu\text{g}.
\end{aligned} \tag{4.2.7}$$

### 4.3 Kuivan ja kostean ilman tiheys

Kostean ilman tiheys saadaan nyt laskettua kostean ilman massasta ja pullon tilavuudesta siten, että

$$\begin{aligned}
\rho &= \frac{m'}{V} = \frac{372,44 \mu\text{g}}{315 \text{ ml}} \\
&\approx 1,1823 \text{ g/m}^3.
\end{aligned} \tag{4.3.1}$$

Virheeksi saadaan maksimi-minimikeinolla

$$\begin{aligned}
\delta\rho &= \rho \left( \frac{\delta m'}{m'} + \frac{\delta V}{V} \right) \\
&= 1,1823 \text{ g/m}^3 \cdot \left( \frac{0,93 \mu\text{g}}{372,44 \mu\text{g}} + \frac{3 \text{ ml}}{315 \text{ ml}} \right)
\end{aligned} \tag{4.3.2}$$

$$\approx 0,0142 \text{ g/m}^3. \tag{4.3.3}$$

Kyllästymispaine  $e_m$  saadaan interpoloimalla taulukoituja arvoja. Interpolointi on tehty sovittamalla suora lämpötila-paine -pistejoukkoon. Pistejoukossa on lämpötiloja  $25^\circ\text{C} \dots 35^\circ\text{C}$  vastaavat osapaineet. Suoransovitus on

esitetty kuvassa 3 ja sen sovitusparametrien  $a = (1,4603 \pm 0,0398)$  mbar/ $^{\circ}\text{C}$  ja  $b = (-5,4682 \pm 0,8054)$  mbar avulla saadaan paineeksi

$$\begin{aligned} e_m &= aT + b \\ &= 1,4603 \text{ mbar}/^{\circ}\text{C} \cdot 21,3 \text{ }^{\circ}\text{C} - 5,4682 \text{ mbar} \\ &\approx 2,563 \text{ 619 kPa} \end{aligned} \quad (4.3.4)$$

ja virheeksi maksimi-minimikeinolla

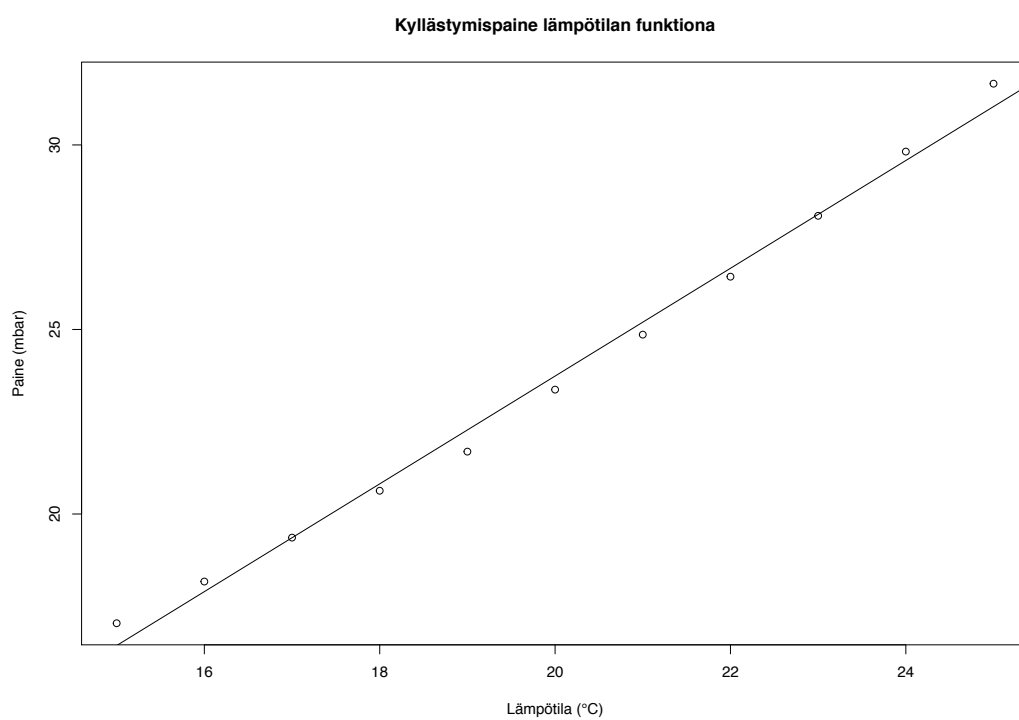
$$\begin{aligned} \delta e_m &= aT \left( \frac{\delta a}{a} + \frac{\delta T}{T} \right) + \delta b \\ &= 1,4603 \text{ mbar}/^{\circ}\text{C} \cdot 21,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \left( \frac{0,0398 \text{ mbar}/^{\circ}\text{C}}{1,4603 \text{ mbar}/^{\circ}\text{C}} + \frac{0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}}{21,3 \text{ }^{\circ}\text{C}} \right) + 0,8054 \text{ mbar} \\ &\approx 0,209 \text{ 123 kPa}. \end{aligned} \quad (4.3.5)$$

Ilman moolimassa voidaan laskea ilman koostumuksen avulla, jolloin saadaan  $M_i = 28,9715$  g/mol ja vastaavasti vedelle  $M_v = 18,016$  g/mol [3].

Sijoittamalla saadut arvot kaavaan (2.2.6) kuivan ilman tiheydeksi saadaan

$$\begin{aligned} \rho_i &= \frac{\rho p}{p - f e_m \tilde{M}} \\ &= \frac{1,1823 \text{ g}/\text{m}^3 \cdot 100,9 \text{ kPa}}{100,9 \text{ kPa} - 16,7 \% \cdot 2,563 \text{ 619 kPa} \cdot \left( 1 - \frac{18,016 \text{ g}/\text{mol}}{28,9715 \text{ g}/\text{mol}} \right)} \\ &\approx 1,1842 \text{ g}/\text{m}^3 \end{aligned} \quad (4.3.6)$$

ja virheeksi tulee kaavan (2.2.8) avulla  $\delta \rho_i \approx 0,0143$  g/ $\text{m}^3$ .



Kuva 3: Kyllästymispaineen taulukkoarvojen interpolointi [3]

#### 4.4 Ilman tiheyden normitus NTP-olosuhteisiin

Ideaalikaasulain ja tiheyden välisestä yhteydestä (2.1.2) voidaan laskea kuivan ilman moolimassa siten, että

$$M = \frac{\rho_i R T}{p_i}$$
$$= \frac{1,1842 \text{ g/m}^3 \cdot 8,314\,510 \text{ J/molK} \cdot 294,45 \text{ K}}{100,9 \text{ kPa}} \quad (4.4.1)$$

$$\approx 0,028\,733 \text{ g/mol}, \quad (4.4.2)$$

missä  $R$  on niin kutsuttu moolinen kaasuvakio [3].

Moolimassan virheeksi saadaan maksimi-minimikeinolla olettaen, että  $\delta R = 0$ , jolloin

$$\delta M = M \left( \frac{\delta \rho_i}{\rho_i} + \frac{\delta T}{T} + \frac{\delta p_i}{p_i} \right)$$
$$= 0,028\,733 \text{ g/mol} \cdot \left( \frac{0,0143 \text{ g/m}^3}{1,1842 \text{ g/m}^3} + \frac{0,2 \text{ kPa}}{100,9 \text{ kPa}} + \frac{0,3 \text{ }^\circ\text{C}}{21,3 \text{ }^\circ\text{C}} \right)$$
$$\approx 0,000\,809 \text{ g/mol}. \quad (4.4.3)$$

NTP-oloissa tiheys saadaan moolitilavuuden  $V_m = 22,4141 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$  [3] avulla, jolloin kuivan ilman tiheydeksi tulee

$$\rho_{NTP} = \frac{M}{V_m} = \frac{0,028\,733 \text{ g/mol}}{22,4141 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}}$$
$$\approx 1,282 \text{ g/m}^3 \quad (4.4.4)$$

ja sen virheeksi maksimi-minimikeinolla olettaen, että  $\delta M = 0$ , tulee

$$\delta\rho_{NTP} = \rho_{NTP} \left( \frac{\delta M}{M} \right) \quad (4.4.5)$$

$$= 1,282 \text{ g/m}^3 \cdot \left( \frac{0,000\,809 \text{ g/mol}}{0,028\,733 \text{ g/mol}} \right) \quad (4.4.6)$$

$$\approx 0,037 \text{ g/m}^3. \quad (4.4.7)$$

Ilman tiheyden NTP-arvolle löytyy kirjallisuusarvo  $\rho = 1,293 \text{ g/m}^3$  [3], joka sisältyy kokeellisesti selvitetyn arvon virherajoihin.

## 5 Johtopäätökset

Pullossa olevan ilman kokonaismassaksi saatiin  $m' = (372,4 \pm 1,0) \mu\text{g}$ , jonka avulla kostean ilman tiheydeksi määritettiin  $\rho = (1,182 \pm 0,015) \text{ g/m}^3$ . Ideaalikaasulain avulla kuivan ilman tiheydeksi saatiin  $\rho_i = (1,184 \pm 0,015) \text{ g/m}^3$ . Mittaustilanteessa laboratorion lämpötilaksi luettiin  $T = (21,3 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$ , suhteelliseksi ilmankosteudeksi  $f = (16,7 \pm 0,2) \%$  ja ilmanpaineeksi  $p_i = (100,9 \pm 0,2) \text{ kPa}$ . NTP-olosuhteisiin normitettu tiheyden arvo on siten  $\rho_{NTP} = (1,28 \pm 0,04) \text{ g/mol}$ . Saatua tiheys NTP-olosuhteissa sisältyy virherajoihin kirjallisuusarvoon  $1,293 \text{ g/mol}$ .

Kuivan ja kostean ilman tiheyksien arvot eivät vastaa intuitiivista käsitystä, jonka mukaan kostean ilman tiheys pitäisi olla kuivan ilman tiheyttä suurempi – onhan kosteassa ilmassa enemmän vesihöyryä. Kuitenkin mittaustulosten perusteella kuivan ilma onkin kosteaa ilmaa tiheämpää. Tämä omituinen havainto voidaan selittää Avogadron lailla, jonka mukaan samassa paineessa, lämpötilassa ja tilavuudessa olevilla kaasuilla on sama määrä molekyylejä [4]. Siispä kosteassa ilmassa on enemmän vesimolekyylejä, mutta vähemmän muiden kaasujen molekyylejä. Veden moolimassa on noin  $18 \text{ g/mol}$ , kun taas



kuivan ilman keskimääräinen moolimassa on noin 29 g/mol, joten kun vesihöyry syrjäyttää ilman muita kaasuja, sen massa ja siten tiheys alenee. Tämän periaatteen mukaan ilman tiheyden ja kosteuden välillä on käänteinen riippuvuus eli mitä suurempi ilmankosteus, sitä pienempi ilman tiheys.

Ilman mallinnus ideaalikaasuna ei ole paras mahdollinen mallinnus, sillä esimerkiksi ilman lämpötila ei välttämättä ole riittävän kaukana kastepisteestä. Kuitenkin tätä tehtävää varten ideaalikaasulaki tarjoaa yksinkertaisen mallin ja sen ennustamat tulokset yhtenevät kirjallisuusarvojen kanssa.

## Viitteet

- [1] Randall. D. Knight, *Physics for Scientists and Engineers – 4<sup>th</sup> Global Edition*, Pearson 2017
- [2] John. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis – 2<sup>nd</sup> Edition*, University Science Books, 1997
- [3] MAOL ry, *MAOL-taulukot*, Otava 2013
- [4] Angus Stevenson, Christine A. Lindberg, *New Oxford American Dictionary*, Oxford University Press 2010

## Liitteet

1. Mittaustulokset
2. Mittauspöytäkirja

## Liite 1 Mittaustulokset

Taulukko 2: Mitatut pullon paine-erot ja massat

| Sarja | Mittaus | Paine-ero $\Delta p$ (mbar) | Pullon massa $m_p$ (g) |
|-------|---------|-----------------------------|------------------------|
| 1     | 1       | $1010 \pm 9$                | $194,944 \pm 0,001$    |
|       | 2       | $803 \pm 8$                 | $195,019 \pm 0,001$    |
|       | 3       | $585 \pm 8$                 | $195,102 \pm 0,001$    |
|       | 4       | $385 \pm 7$                 | $195,173 \pm 0,001$    |
|       | 5       | $251 \pm 7$                 | $195,222 \pm 0,001$    |
|       | 6       | $162,2 \pm 1,1$             | $195,255 \pm 0,001$    |
|       | 7       | $122,8 \pm 1,0$             | $195,270 \pm 0,001$    |
|       | 8       | $86,6 \pm 0,9$              | $195,282 \pm 0,001$    |
|       | 9       | $48,9 \pm 0,8$              | $195,297 \pm 0,001$    |
|       | 10      | $26,4 \pm 0,7$              | $195,306 \pm 0,001$    |
|       | 11      | $10,1 \pm 0,7$              | $195,312 \pm 0,001$    |
|       | 12      | $-0,5 \pm 0,6$              | $195,313 \pm 0,001$    |
| 2     | 1       | $1010 \pm 9$                | $194,941 \pm 0,001$    |
|       | 2       | $796 \pm 8$                 | $195,020 \pm 0,001$    |
|       | 3       | $626 \pm 8$                 | $195,083 \pm 0,001$    |
|       | 4       | $482 \pm 8$                 | $195,137 \pm 0,001$    |
|       | 5       | $371 \pm 7$                 | $195,178 \pm 0,001$    |
|       | 6       | $288 \pm 7$                 | $195,208 \pm 0,001$    |
|       | 7       | $223 \pm 7$                 | $195,232 \pm 0,001$    |
|       | 8       | $170,1 \pm 1,1$             | $195,252 \pm 0,001$    |
|       | 9       | $128,7 \pm 1,0$             | $195,268 \pm 0,001$    |
|       | 10      | $92,7 \pm 0,9$              | $195,280 \pm 0,001$    |
|       | 11      | $57,2 \pm 0,8$              | $195,293 \pm 0,001$    |
|       | 12      | $30,5 \pm 0,7$              | $195,302 \pm 0,001$    |
|       | 13      | $13,9 \pm 0,7$              | $195,309 \pm 0,001$    |
|       | 14      | $0,0 \pm 0,6$               | $195,314 \pm 0,001$    |