Oluen lämpeneminen saunassa

Termofysiikan essee

Syksy 2012

25.3.2013

Sisältö

1 Johdanto

Tässä esseessä tutkimme oluen lämpenemistä saunassa. Jokainen saunassa olutta, tai muuta nestettä, juonut tuntee ilmiön, jossa neste alkaa hiljalleen lämpenemään, ja varsinkin kylminä nautittavien juomien, kuten oluen, tapauksessa tekee siitä pian epämiellyttävää juoda. Halusimme luoda empiirisen mallin oluen lämpenemiselle ja saada selville, kuinka kauan saunassa voi kerralla olla, ennen kuin olut "väljähtää". Lisäksi tuntemalla oluen lämpenemiseen liittyvät prosessit on mahdollista suunnitella parempia olutlaseja, joissa olut kestää viileämpänä kauemmin.

Tavoitteena on vertailla lämmön eri siirtymistapoja ja niiden vaikutusta oluen lämpötilaan. Olemme jaotelleet lämmön siirtymistavat säteilyyn, johtumiseen ja latenttiin lämpöön. Loimme koetilanteen, jossa minimoimme aina kerrallaan yhden siirtymistavan vaikutuksen. Olutta säästääksemme vertasimme myös veden ja oluen lämpenemistä, jotta kokeet voitaisiin suorittaa vedellä.

Tehtyjä mittauksia verrattiin teoreettiseen numeeriseen malliin. Vertailemalla näitä tuloksia päättelimme, missä suhteessa lämpövuot ovat toisiinsa nähden ja onko jokin lämmönsiirtotapa toista dominoivampi.

Koejärjestely, ja varsinkin lämpömittarina käytetty elektroninen paistomittari, aiheutti epätarkkuutta mittauksiin, mutta kvalitatiivisesti tarkasteltuna tulokset antavat mielestämme hyvän approksimaation oluen lämpenemiselle saunassa.

Esseen tarkoituksena on myös parantaa tekijöiden tieteellisen kirjoittamisen taitoa ja mahdollistaa termofysiikan kurssilla opittujen asiakokonaisuuksien soveltaminen käytännön ongelmaan, mikä on mielestämme koko fysiikan tutkimuksen ydin ja ehdottomasti palkitsevinta fysiikan opiskelussa.

2 Teoria

Termodynamiikan nollannen pääsäännön mukaan lämpötilaerot pyrkivät aina tasoittumaan, eli lämpöä virtaa spontaanisti kuumemmasta kappaleesta kylmempään, kunnes ne ovat tasapainossa (**?**, s. 136). Lämpöenergian siirtyminen voidaan jakaa kolmeen eri tapaan: säteilyyn, johtumiseen ja latentin lämmön vuohon (**?**, s. 268-272). Saunassa ympäristön lämpötila on olutta korkeampi, joten lämmön pitäisi virrata olueen. Toisaalta nesteen haihtuminen voi viilentää jäljelle jäävää olutta (**?**, s. 41-44).

2.1 Johtuminen

Lämpötila kuvaa aineen hiukkasten keskimääräistä liike-energiaa. Hiukkasten törmätessä toisiinsa korkeamman liike-energian omaava hiukkanen luovuttaa liike-energiaa pienemmän liike-energian kappaleelle liikemäärän säilymislain mukaisesti. Makroskooppisella tasolla tämä havaitaan lämmön johtumisena.(**?**, s.479) Lämpötilaeroa yhdessä ulottuvuudessa tasoittava lämpövuon muutos aikayksikössä $\frac{dQ}{dt}$ on verranollinen lämpötilagradienttiin kaavan (**??**) mukaan (**?**, s.479).

$$\frac{dQ}{dt} = kA\frac{\Delta T}{L} \tag{1}$$

A on kappaleen poikki-pinta-ala, ΔT kahden pisteen välinen lämpötilaero ja k lämmönjohtavuuskerroin. Lämpövuo riippuu siis myös johtavan aineen fysikaalisista ominaisuuksista, joita parametrisoidaan lämmönjohtavuuskertoimella k ja johtavan aineen pinta-alasta. Lämmonjohtavuuskerroin kuvaa kuinka paljon energiaa sirtyy aikayksikköä, pituusyksikköä ja lämpötilaeroa kohti. L on kahden mitattavan pisteen välinen etäisyys, joiden lämpötilat ovat T_1 ja T_2.

2.2 Säteily

Lämpöliike aiheuttaa molekyylien virittymistä korkeammille energiatasoille niiden absorboidessa fotoneja, eli sähkömagneettista säteilyä. Näiden viritystilojen purkautuessa molekyylit emittoivat fotoneja. Nämä fotonit puolestaan voivat virittää muita molekyylejä. Tällä tavalla kaikki aineet säteilevät sähkömagneettista säteilyä (**?**, s. 155). Fotonien lähettämän sähkömagneettisen säteilyn tyypillinen aallonpituus osuu infrapunan alueelle (**?**, s. 459). Koska korkeammassa lämpötilassa olevat molekyylit värähtelevät enemmän siirtävät ne energiaa toisiin molekyyleihin emittoimalla fotoneja, jotka alhaisemmassa lämpötilassa olevat molekyylit voivat absorboida.

Mustalla kappaleella tarkoitetaan esinettä, mikä absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn ja emittoi säteilyä Plancin säteilylain mukaisesti (**?**, s. 160-162). Käytännön kappaleet harvoin ovat täydellisiä mustia kappaleita, joten fysiikassa käytetään usein käsitettä harmaa kappale, joka käyttäytyy kuten musta kappale, mutta sitä on korjattu empiirisellä emissio-kertoimella ε (**?**, s. 165).

Sähkömagneettisen säteilyn kautta siirtyneen lämmön suuruus saadaan Stefan-Boltzmannin lain (**??**) avulla (**?**, s. 271).

$$\frac{dP}{dA} = \varepsilon \sigma T^4 \tag{2}$$

Kun otetaan huomioon, että toisaalta kappale absorboi ja toisaalta emittoi säteilyä, ja että tehon muutos pinta-alaa kohden on verrannollinen lämpövuon ensimmäiseen aikaderivaattaan ja kääntäen verrannollinen kappaleen poikkipinta-alaan (**?**, s. 269) saamme siirtyneelle lämpömäärälle aikayksikössä kaavassa (**??**) esitetyn muodon.

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \tag{3}$$

Kaavassa (**??**) ε on kappaleen emissiokykyä kuvaava kerron joka mustalle kappaleelle on $\varepsilon = 1$ ja kaikille muille kappaleille $0 < \varepsilon < 1$. σ on Stefan-Boltzmannin vakio, jonka arvo on $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$, A on kappaleen poikkipinta-ala, T_1 kappaleen lämpötila ja T_2 ympäristön lämpötila. (**?**, s. 271)

2.3 Latentti lämpö

Molekyylien törmäykset nesteessä voivat antaa hetkellisesti yksittäiselle molekyylille tarpeeksi liike-energiaa, mikä vaaditaan nestefaasin molekyylisidosten rikkomiseen. Tällöin molekyylin voidaan katsoa hetkellisesti muuttuvan nesteestä kaasuksi. Kaasufaasiin siirtynyt molekyyli pystyy karkaamaan nesteestä. Tätä kutsutaan haihtumiseksi. Toinen tapa nähdä asia on, että molekyyli saa tarpeeksi liike-energiaa poistuakseen nesteestä, ja poistuttuaan muuttuu kaasuksi. Haihtuminen joka tapauksessa sitoo liike-energiaa nesteestä ja täten alentaa nesteen lämpötilaa. Lämpöenergian siirtymistä nesteestä kaasuun haihtumisen kautta kutsutaan latentin eli piilevän lämmön vuoksi, sillä olomuodonmuutoksiin sitoutunutta lämpöenergiaa ei voi suoraan mitata kaasusta lämpömittarilla. (**?**, s. 41-44)

Vesimolekyylit voivat myös iskeytyä kaasusta nesteen pintaan, luovuttaa nesteeseen liike-energiaa ja jäädä nesteen sisäisten molekyylisidosten vangiksi.

Tällöin nesteen lämpötila nousee. Tätä kutsutaan tiivistymiseksi. Haihtumisen ja tiivistymisen suhde riippuu ilman suhteellisesta kosteudesta. Suhteellisen kosteuden ollessa alle 100 prosenttia haihtuminen dominoi ja suhteellisen kosteuden ollessa yli 100 prosenttia tiivistymistä tapahtuu enemmän. Suhteellinen kosteus riippuu ilman paineesta, lämpötilasta sekä vesihöyryn määrästä. (**?**, s. 41-44)

Latentin lämmön vuota voimistaa nesteen lämpötila, koska molekyylien liikeenergian kasvaessa sidoksen rikkoutumisen todennäköisyys kasvaa. Ilman suhteellisen kosteuden kasvu puolestaan lisää todennäköisyyttä, että molekyylit palaavat takaisin nesteen, jolloin latentin lämmön vuo vähenee. Ilmavirtauksen nopeuden kasvaminen lisää todennäköisyyttä, että molekyylit eivät palaa takaisin nesteeseen virtauksen viedessä niitä kauemmaksi siitä. Samalla turbulenssi lisää hiukkasten pystysuuntaista nopeutta jolloin hiukkaset iskeytyvät useammin nesteeseen. (**?**, s. 41-44)

Kun tiedetään haihtuvat veden määrä saadaan selville haihtumiseen kulunut energia. Haihtuneen veden määrä voidaan mitata vaa'alla, mutta sen selvittämiseksi on monia empiirisiä kaavoja. Massan mittaaminen on haastavaa, sillä haihtuneen veden määrä on niin vähäinen, että sen mittaamiseen tarvitaan erittäin tarkkoja vaakoja. Kirjallisuudesta löytyy monia muitakin empiirisiä kaavoja, mutta kaavat antavat hyvin samansuuruisia tuloksia tutkimassamme tapauksessa. Yksi yleisesti meteorologiassa käytetty kaava on (**?**, s. 43):

$$Q = C_e \rho v (q_s^* - q_a) \tag{4}$$

jossa ρ on ilman tiheys, v on tuulen nopeus,C_e on Daltonin luku, joka on $C_e = 1.1 * 10^{-3}$ (**?**, s. 73) ja q_a on ilman ominaiskosteus, jolle voidaan käyttää arvoa $60 * 10^{-3} \frac{1}{kg}$ (**?**).

q_s^* on kyllästysominaiskosteus ja sille on lämpötilasta T ja paineesta p riippuva kaava $q_s^*(T,p) = \frac{\varepsilon e_s(T)}{p}$ (**?**, s. 42), jossa ε on veden ja ilman molekyylipainojen suhde $\varepsilon = 0.62198$, p on paine $p = 1000mbar$. $e_s(T)$ on vesihöyryn kyllästyspaine lämpötilassa T ja sille on johdettavissa kokeellinen approksimaatio $e_s(T) \approx Ae^{\frac{-B}{T}}$ (**?**, s. 53). A ja B ovat kokeellisia vakioita $A = 2.53 * 10^8 kPa$ ja $B = 5.42 * 10^3 K$ ja T on nesteen pinnalla olevan ilman lämpötila.

3 Malli

Teoreettisessa mallissa johtumisesta, säteilystä ja latentin lämmön vuosta johtuva nesteen lämpeneminen on laskettu yhteen, jotta saadaan kokonaislämpeneminen.

$$\frac{dQ_{tot}}{dt} = \frac{dQ_j}{dt} + \frac{dQ_s}{dt} + \frac{dQ_l}{dt} \tag{5}$$

Q_j on johtumisesta aiheuttava lämpövuo, joka saadaan kaavalla (**??**). Vastaavasti Q_s ja Q_l ovat säteilystä ja latentista lämmöstä aiheutuvat lämpövuot, mitkä saadaan vastaavasti kaavoilla (**??**) ja (**??**).

Koska $Q = c_{vesi} m \Delta T$, jossa c_{vesi} on veden ominaislämpökapasiteetti $c_{vesi} = 4{,}19 \frac{kJ}{KgK}$ ja m on veden massa, saadaan nesteen lämpötilanmuutos dT pienen ajanhetken dt aikana kaavalla (**??**).

$$dT = \frac{dQ_{tot}}{dt} \frac{1}{c_{vesi} m} \tag{6}$$

Mallissa oletetaan, että neste ja alumiinitölkki tai muovilasi ja neste itse ovat jatkuvasti lämpötasapainossa.

Lämmönjohtavuuskertoimen k arvo voidaan määrittää kokeellisesti aina jokaiselle materiaalille erikseen. Esimerkiksi kuivalle ilmalle $k = 0.024 \frac{W}{Km}$ ja puulle $k = 0.04 \ldots 0.12 \frac{W}{mK}$ (**?**, s. 479).

Lämpö voi saunassa johtua olueen eri tavoin. Ilmasta nesteeseen, ilmasta tölkin tai lasin kautta nesteeseen, lauteesta lasin kautta nesteeseen tai lauteesta ilman ja lasin kautta nesteeseen. Yksinkertaistamme tilannetta olettamalla, että lämpö johtuu suoraan ilmasta nesteeseen ja että lauteet eivät johda lämpöä lasiin, vaan lauteen ja lasin välissä on pieni ilmapatsas, jonka lampeäminen lämmittää lasia pohjasta.

Seinät on oletettu mustaksi kappaleeksi. Lasi puolestaan voidaan approksimoida harmaaksi kappaleeksi, jonka emissiokerrointa voidaan muuttaa foliolla. Tällöin säteilyteho saadaan Stefan-Boltzmanin lain mukaan kaavalla (**??**).

Latentin lämmön vuo riippuu kaavan (**??**) mukaisesti nesteen lämpötilasta, ilmankosteudesta, nesteen tiheydestä ja ilman nopeudesta lasin yläpuolalla. Ilman lämpötila nesteen yläpuolella on oletettu lähes nesteen lämpöiseksi konvektion vaikutuksesta. Tuulen nopeudeksi taas lasin yläpuolella on oletettu olevan maksimissaan $v = 1 \frac{m}{s}$

Alumiinitölkki ja muovilasi approksimoitiin samanlaisiksi ympyräpohjaisiksi lieriöiksi, jonka mitat olivat pohjan halkaisija $d = 6cm$ ja korkeus $h = 11cm$.

4 Mittalaite ja mittaukset

Mittasimme oluen ja veden lämpenemistä saunan lauteilla. Mittarina käytimme elektronista paistomittaria. Lämpömittari näytti nesteen lämpötilan $1°C$ tarkkuudella. Nestettä ei varsinaisesti sekoitettu lämpötilaa mitattaessa viimeistä mittausta lukuunottamatta. Nesteet otettiin pois saunasta 23 minuutin kohdalla.

Ensimmäiset 10 minuuttia mittaussarjassa saunassa oli läsnä ainoastaan kaksi mittaajaa. Kymmenen minuutin kohdalla saunaan otettiin mukaan viisi muuta saunojaa, jotka alkoivat heittää löylyä. Saunan lämpötila lauteiden kohdalla oli $60°C$ ja pysyi vakiona mittaussarjan ajan.

Mitattavat nesteet on esitetty kuvassa **??**. Lisäksi kuvassa **??** on esitetty kartonkinen lieriö, joka asetettiin yhden vesilasin ympärille.

Kuva 1: Mittauksissa käytetyt nesteet ja lasit

Kuva 2: Kartongista tehty lieriö, joka asetettiin yhden vesilasin ympärille

Mitattavana oli $33cl$ olutta tai vetta seuraavalla tavalla:

(i) olut tölkissä lauteen päällä
(ii) vettä oluttölkissä lauteen päällä
(iii) vettä vesilasissa lauteen päällä
(iv) vettä vesilasissa pyyhkeen päällä, joka sijaitsi lauteen päällä
(v) vettä vesilasissa lauteen päällä siten, että ympärillä oli paperikartonki
(vi) vettä vesilasissa lauteen päällä siten, että veden pinnalla oli noin 1cm ruokaöljykerros
(vii) vettä vesilasissa siten, että lasin sivuilla oli alumiinifoliota

Kolmesta ensimmäisestä mittausastian mittauksista voi päätellä, miten vesi ja olut sekä alumiininen oluttölkki ja muovinen vesilasi eroavat toisistaan lämmön siirtymisen kannalta. Lauteen päälle laitetulla pyyhkeellä on pyritty estämään lauteesta johtuva lämpövuo. Paperikartongin asettaminen lasin päälle puolestaan estää ilmavirtauksia lasin ympärillä. Ruokaöljykerroksella veden päällä on pyritty poistamaan haihtumisen vaikutus lämpenemiseen ja alumiinifoliolla on pienennetty kappaleen emissiokerrointa, jotta lämpösäteilyn vaikutus pienenisi.

5 Tulokset

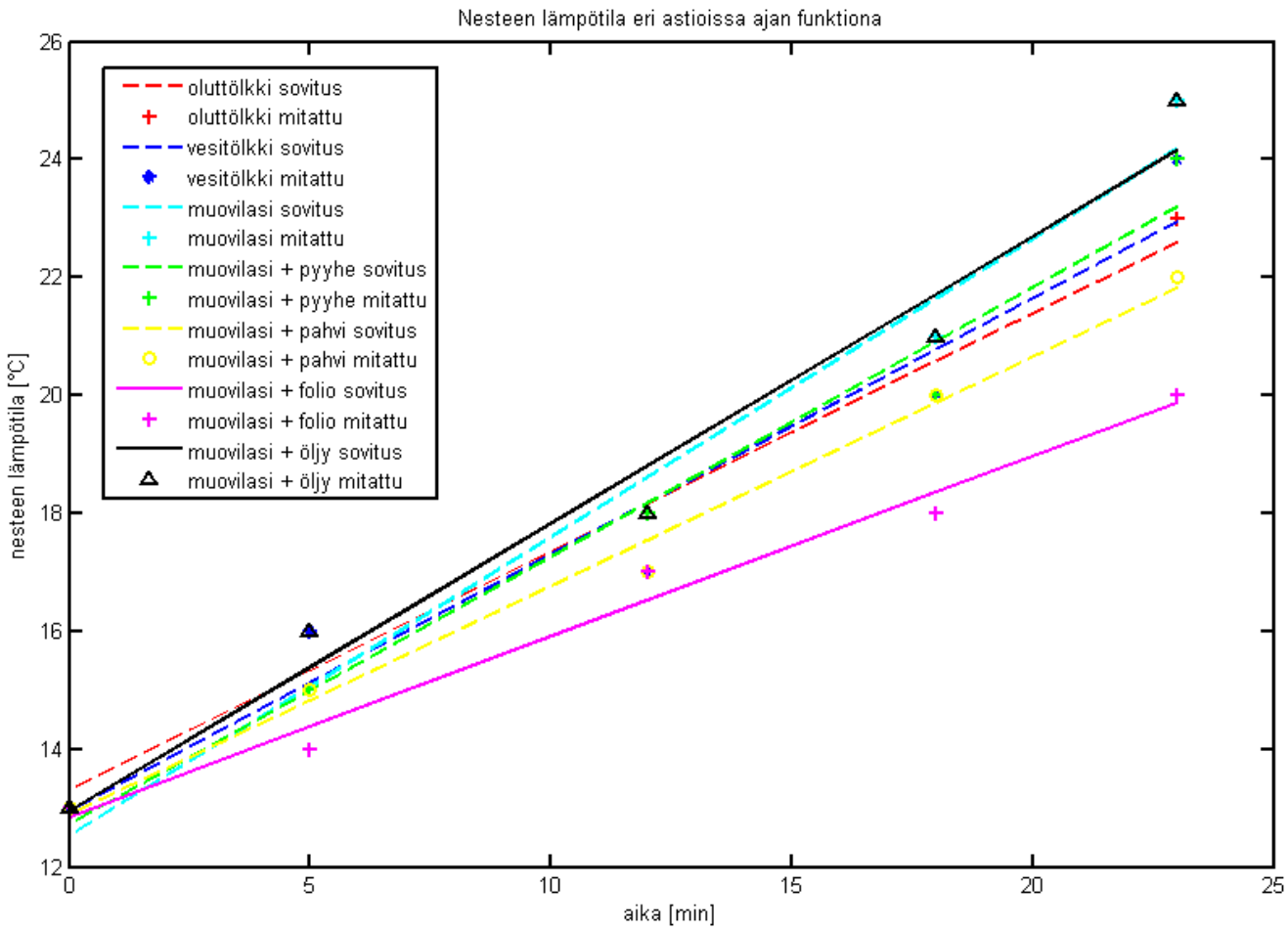
Mittauksen tulokset on esitetty taulukossa **??** ja **??**.

Taulukko 1: Mittaustulokset

Mittaus	$T(t = 0s)$ [°C]	$T(t = 5min)$ [°C]	$T(t = 12min)$ [°C]	$T(t = 18min)$ [°C]	$T(t = 23min)$ [°C]
1	13	16	18	20	23
2	13	16	17	20	24
3	13	15	18	21	25
4	13	15	18	20	24
5	13	15	17	20	22
6	13	14	17	18	20
7	13	16	18	21	25

Taulukko 2: Mittausnumeroita vastaavat mittaukset

Mittauksen numero	Mitattava kohde
1	Tölkki, jossa olutta
2	Tölkki, jossa vettä
3	Muovilasi, jossa vettä
4	Muovilasi, jossa vettä ja pyyhe alla
5	Muovilasi, jossa vettä ja ympärillä paperikartonki
6	Muovilasi, jossa vettä ja ympärillä alumiinifolio
7	Muovilasi, jossa vettä ja päällä ruokaöljykerros



Kuva 3: Mittaustulokset esitettynä (t,T)-kuvaajassa pns-sovituksineen

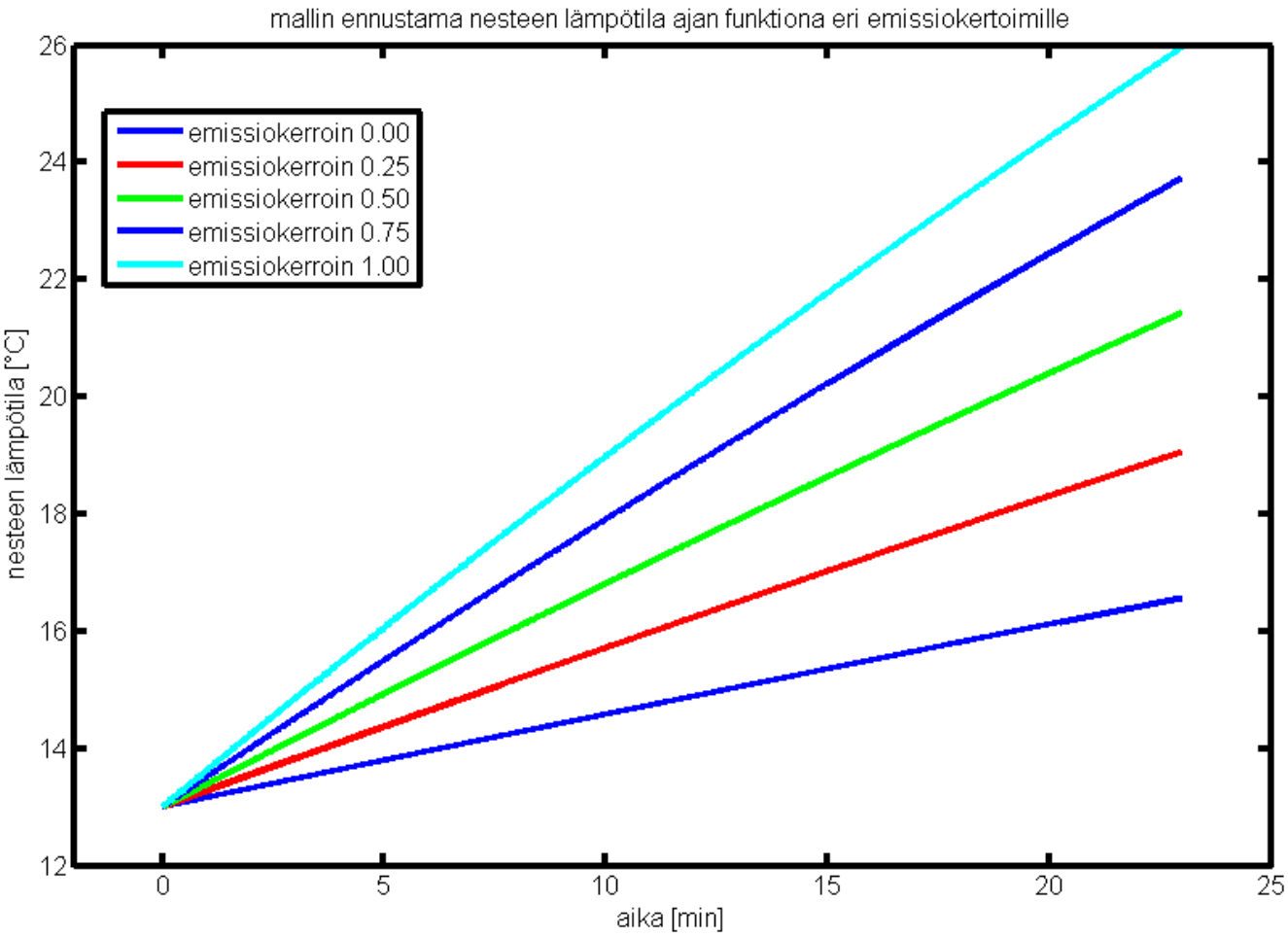
Mittaustulokset on esitelty kuvassa **??**. Kuvaajaan on piirretty pisteiden kautta kulkeva pienemmän neliösumman sovitussuora.

Kaikki nesteet lämpenivät lineaarisesti mitatun ajanjakson aikana. On havaittavissa, että nesteen laadulla ei ollut merkitystä, sillä olut ja vesi lämpenivät yhtä nopeasti oluttölkissä samoissa olosuhteissa. Myöskään varsinaisella astialla ei ollut tässä tapauksessa merkitystä, sillä vesi lämpeni yhtä nopeasti lasissa ja tölkissä, kuten kuvassa **??** on esitetty.

Kuvasta **??** näemme myös, että ainoat mittaukset, jotka erosivat merkittävästi muista olivat vesilasit, joissa ympärille oli laitettu fyysinen este - joko alumiinifolio tai pahvikartio. Mittaustarkkuuden ja lämpötilaerojen suhde aiheuttaa kuitenkin haasteita tulosten vertailuun.

Matlabilla tehty ohjelma (Liite A) laskee sekunnin välein lämpötilanmuutoksen yhdelle pisteelle kaavan (**??**) mukaan, kun pisteen alkulämpötila on $T_{alku} = 13°C$ ja ympäristön lämpötila pysyy jatkuvasti arvossa $T_{ymp} = 60°C$.

Kuvissa ?? ja ?? on esitetty lämpötilanmuutos eri emissiokertoimilla. Kuvaajista nähdään, että emissiokerroin vaikuttaa voimakkaasti lämmönmuutosnopeuteen säteilyvuota muuttamalla.

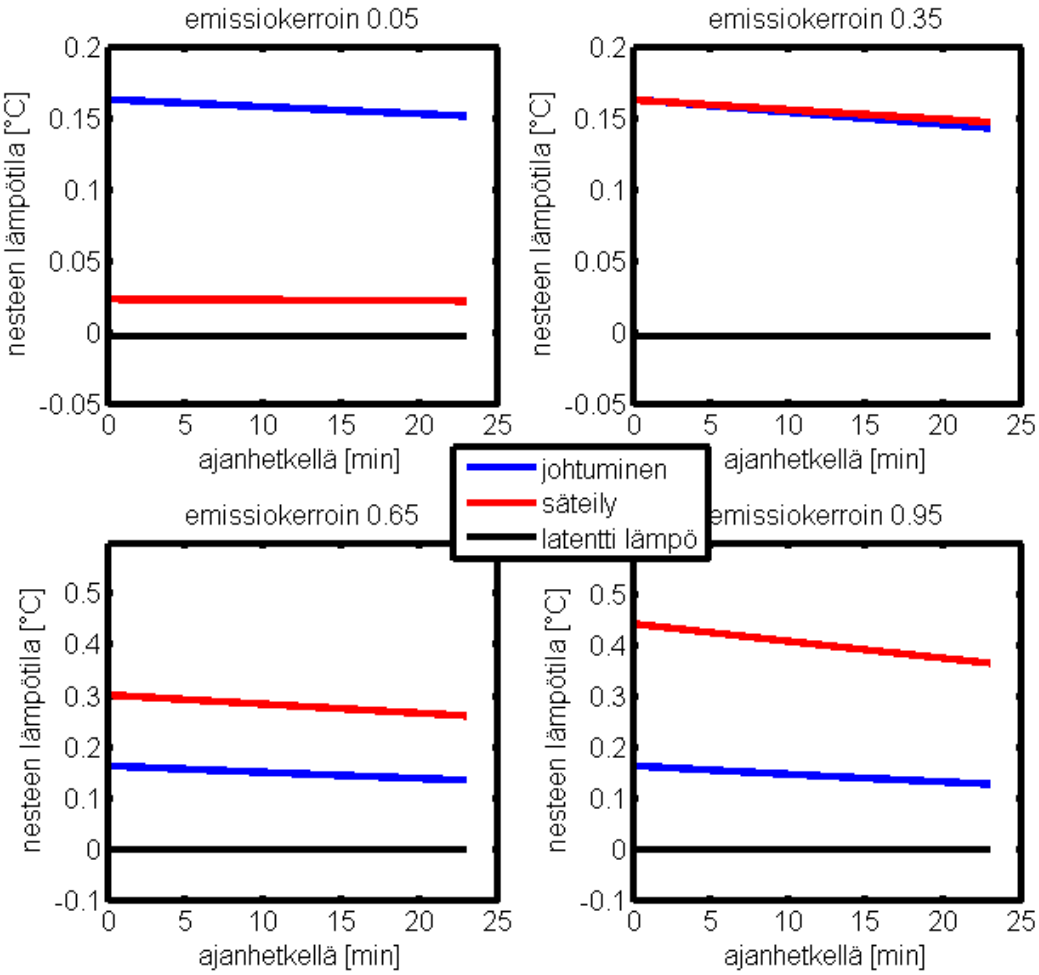


Kuva 4: Teoreettinen malli lämpötila ajan funktiona eri emissiokertoimilla

5.1 Virhelähteet

Merkittävin virhelähde mittauksissa on lämpötilamittari. Mittarin resoluutio on 1 celciusaste ja virherajat eivät ole tunnettuja. Mittarin malli ei ollut tiedossa. Mittarin virheitä arvioitiin mittaamalla lumi-vesi seoksen ja kiehuvan veden lämpötilaa. Lumivesiseoksen lämpötilaksi oletettiin $T_{lumi} = 0°C$ ja mittari näytti tällöin $T = 0°C$. Kiehuvan veden lämpötilaksi oletettiin $T_{kiehuvavesi} = 100°C$ ja tälle mittari puolestaan näytti $T = 99°C$, joten mittari vaikutti kuitenkin kohtuullisen luotettavalta.

Mittauksia tehtäessä mittari oli vain osittain nesteessä ja aistihavainnoinkin oli havaittavissa, että mittarin yläosa lämpesi. Suuruusluokka saattaa kuiten-



Kuva 5: Lämpövoiden vaikutus nesteen lämpötilaan

kin pitää hyvin paikkansa nesteiden välillä, sillä mittarin lämpeneminen ja siitä aiheutuva mahdollinen virhe oli tasapuolista nesteestä riippumatta. Mittarin sensori vaikutti olevan mittalaitteen kärjessä, joten oletamme myös tästä aiheutuneen virheen pieneksi.

Jokainen yksittäinen mittaussykli kesti noin minuutin, mikä vastasi hyvin myös nesteiden saunaan asettamisaikaa. Toisin sanoen jokaista nestettä mitattaessa mittauksen alkaessa nesteet olivat olleet suhteellisesti yhtä kauan saunassa.

Lasit sijaitsivat noin 15 cm päässä toisistaan. Saunaan varmasti syntyy virtauksia ja lämpötilagradientteja, joita ei ole tässä tutkimuksessa otettu huomioon. Oletus, että lämpötila olisi koko saunassa vakio on karkea yksinkertaistus. Oletamme kuitenkin, että lämpötilagradientit eivät ole voimakkaita horisontaalisesti, ainoastaan vertikaalisesti, jolloin lasit ovat toisiinsa nähden samanlaisessa ympäristössä.

6 Johtopäätökset

Öljypinta veden pinnalla estää vettä haihtumasta ja täten samalla latentin lämmön vuon. Kuvan **??** mittaukset osoittavat, että öljypinnnalla ei ole merkitystä nesteen lämpenemiselle, eli latentin lämmön vuo lähes olematon. Tämä pätee teorian kanssa, jos tuulen nopeus on suuruusluokkaa $v \sim 1\frac{m}{s}$ (kts. kuva **??**).

Johtuminen ei riipu lasista eikä alustasta. Tämä havaitaan siten, että pyyhkeen laittaminen lasin ja lauteen väliin ei muuta nesteen lämpenemistä (kuva **??**). Lisäksi on havaittavissa, että alumiinitölkki ja muovilasi lämpenevät yhtä nopeasti. Lämpövuo puolestaan heikkenee voimakkaimmin eristämällä lasi pahvilla tai foliolla. Pahvi heikentää säteilyn vaikutusta foliota vähemmän, koska se absorboi säteilyä enemmän itseensä ja täten lämpenee nopeammin kuin folio. Lämmettyään pahvi lämpimänä kappaleena alkaa emittoimaan lämpösäteilyä foliota tehokkaammin juomaan. Folio puolestaan heijastaa lämpösäteilyä ja lämpenee pahvia hitaammin, eristäen juoman ympäristön lämpösäteilyn vaikutukselta.

Mikäli pahvin sisällä oleva juoma olisi folion sisällä olevaa viileämpi, syynä olisi, että johtuminen dominoi lämmönsiirtoprosessia. Tämä olisi seurausta siitä, että metalleilla on suuri lämmönjohtuvuuskerroin (**?**, s.479), ja täten folio johtaa paremmin lämpöä. Mittausten mukaan (kuva **??**) foliolasi lämpenee kuitenkin hitaammin joten oletamme, että säteily dominoi lämpenemistä.

Mittausten lisäksi mallinnuksen perusteella voimme päätellä, että säteily on merkittävin olutta lämmittävä tekijä. Latentin lämmön vuo ei mittausten mukaan merkittävästi vaikuta nesteen lämpötilaan. Lämmönjohtuminen ilmaan ja lauteeseen riippuu voimakkaasti lämpötilagradientista eli konvektiosta, mutta yleisesti on säteilyä heikompaa. Parantamalla kappaleen emissiokykyä johtuminen alkaa kuitenkin dominoida lämpenemistä (kuva **??**).

Tulosten perusteella voimme ennustaa, että folio, joka jättää itsensä ja lasin väliin ilmapatsaan, toimisi parhaana lämpöeristeenä saunassa. Samaa ideaa noudatetaankin yleisesti jo termospulloissa, mutta jo hyvin ohut ja edullinen foliokalvo voisi estää lämmön siirtymistä tehokkaasti.

Liitteet

Liite A: Matlab-skripti teoreettiselle mallille.