

Jaana Karevuo

YLÄPALOKAMINAN LÄMPÖTEKNINEN TARKASTELU

YLÄPALOKAMINAN LÄMPÖTEKNINEN TARKASTELU

Jaana Karevuo
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Energiatekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan koulutusohjelma

Tekijä: Jaana Karevuo

Opinnäytetyön nimi: Yläpalokaminan lämpötekniinen tarkastelu

Työn ohjaajat: Kari Mäntyjärvi, Oulun yliopiston Kerttu Saalasti -instituutti (FMT)
ja Jukka Ylikunnari, Oulun ammattikorkeakoulu

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2017 Sivumäärä: 39

Tässä insinööriyössä tarkasteltiin toimeksiantajalta saatujen suunnittelupiirustusten pohjalta uima-altaiden lämmittämiseen tarkoitettua puulämmitteisen yläpalokaminan lämpötekniisiä ominaisuuksia ja selvitettiin kaminan hyötysuhde.

Tarkastelu aloitettiin laskemalla savukaasulasku, kun kaminan tulipesässä poltetaan panospolttoprosessissa puuta. Syntyvän savukaasun tietojen perusteella laskettiin lämmönsiirto kaminassa. Laskemisen helpottamiseksi kamina jaettiin useampaan eri lämmönsiirrinosaan, joita käsiteltiin erillisinä lämmönsiirtiminä. Savukaasun ja veden lämpötila laskettiin yksi kerrallaan jokaisen lämmönsiirrinosan jälkeen, ja näin saatiin loppulämpötilat viimeisen lämmönsiirtimen jälkeen. Lämpötilaerojen avulla laskettiin kaminan hyötysuhde. Kaikki laskut suoritettiin Excel-laskentaohjelmalla.

Yläpalokaminan laskettu hyötysuhde on yläpalokaminalle varsin hyvä. Työssä tehtiin paljon oletuksia lähtöarvoihin liittyen, joten lopuksi laskettiin tapauksia eri lähtöarvoilla, jotta saatiin selville hyötysuhteeseen eniten vaikuttavat tekijät. Esimerkiksi veden virtausnopeus vaikuttaa paljonkin lopputuloksiin. Lisäksi hyötysuhde on sitä parempi, mitä korkeampi palamislämpötila tulipesässä saavutetaan. Toimeksiantajalle toimitettavaan laskentataulukkoon käyttäjä voi muuttaa lähtöarvoja, kuten lämpötiloja tai veden virtausnopeutta, jolloin taulukko antaa automaattisesti uudet laskelmat.

Asiasanat: yläpalokamina, hyötysuhde, lämmönsiirto, lämpöteho

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	5
2 PUU POLTTOAINEENA	6
2.1 Puun palaminen	6
2.2 Panospolttoprosessi	8
2.3 Adiabaattinen palamislämpötila	8
3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN	9
3.1 Johtuminen	9
3.2 Säteilylämmönsiirto	9
3.3 Konvektio	10
4 YLÄPALOKAMINAN RAKENNE JA TOIMINTA	11
5 LÄMPÖTEKNINEN LASKENTA	13
5.1 Laskentakaavat	14
5.2 Energia- ja massatase	21
5.3 Savukaasun koostumus ja ominaisuudet	22
5.4 Lämmönsiirto	30
5.5 Hyötysuhde	33
6 HYÖTYSUHTEEN PARANTAMINEN	35
7 YHTEENVETO	36
LÄHTEET	37

1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tilaajana on Oulun yliopiston alueyksikön Kerttu Saalasti - Instituutin Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä. Kerttu Saalasti Instituutti on kansainvälinen tutkimusinstituutti, joka osallistuu Suomessa Pohjois-Pohjanmaan alueiden yritysten kehittämiseen erilaisten hankkeiden kautta. (1.)

Työssä tarkastellaan tilaajan suunnittelemien piirustusten pohjalta yläpalotyypisen kaminan lämpötekniisiä ominaisuuksia. Työn tavoitteena on laskea veden lämmittämiseen tarkoitetun yläpalokaminan hyötysuhde. Lisäksi pohditaan helposti toteutettavissa olevia keinoja, joilla voitaisiin edelleen parantaa hyötysuhdetta.

2 PUU POLTTOAINEENA

Puu koostuu kuiva-aineesta ja siihen sitoutuneesta vedestä. Puun kuiva-aineesta noin puolet on hiiltä, suuri osa happea ja hieman vetyä. Loppuosa koostuu pääosin typestä, rikistä ja tuhkasta. Suuri osa kuiva-aineesta on haihtuvia aineita, kuten happea ja vetyä, joten puu palaa pitkällä liekillä vaatien korkean palotilan. (2.)

Palaessaan alkuaineet reagoivat kemiallisesti hapen kanssa. Hiilen ja vedyn reaktio hapen kanssa on lämpöenergiaa luovuttava reaktio, mutta typen ja hapen reaktio on endoterminen eli lämpöenergiaa sitova reaktio. Taulukosta 1 nähdään puun alkuainekoostumus sekä tuhkan osuus ja tyypillinen kosteus. (3. s 79)

TAULUKKO 1. Puun kuiva-ainekoostumus ja kosteusprosentti (3. s 38)

polttoaine	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	N (%)	tuhka (%)	kosteus (%)
puu	50,4	6,2	-	42,5	0,5	0,4	55

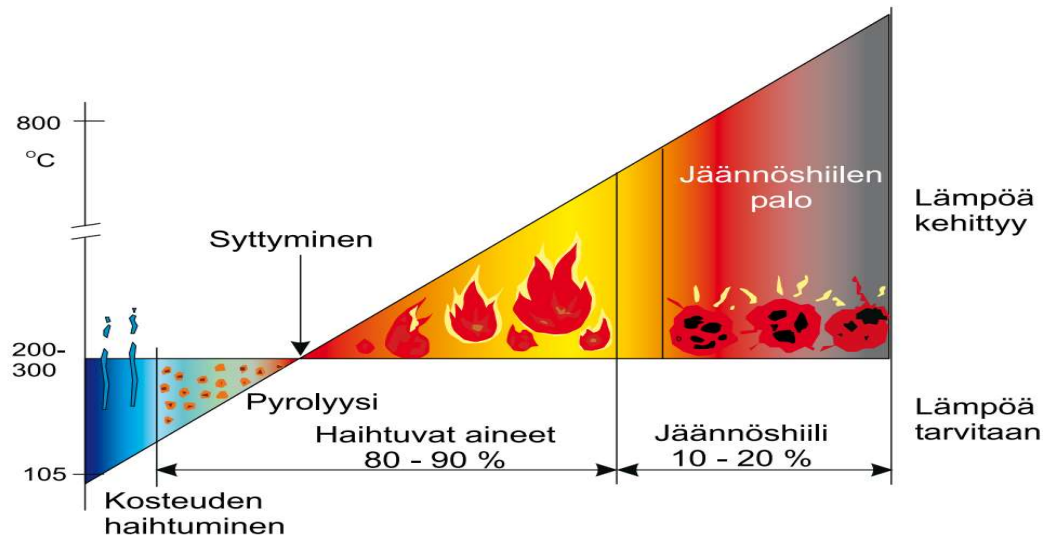
Laadukkaan polttopuun kosteusprosentti on korkeintaan 15–20 %. Mitä kuivempaa polttopuu on, sitä parempi energiahyöty siitä poltettaessa saadaan. Tässä työssä on oletettu, että käytettävän puun kosteudeksi on hyvän kuivauksen ansiosta saatu 20 %. (2.)

2.1 Puun palaminen

Puun palaminen voi olla olosuhteista riippuen joko täydellistä tai epätäydellistä. Puusta saadaan kuitenkin aina enemmän energiaa talteen, mitä täydellisemmin ja puhtaammin palamisprosessi tapahtuu. (2.)

Puun palamisessa on havaittavissa neljä eri vaihetta, jotka ovat kosteuden haihtuminen, pyrolyysi, syttyminen ja jäännöshiilen palaminen. Näiden vaiheiden aikana puun sisältämät alkuaineet reagoivat ilmassa olevan hapen kanssa. Kuvasta 1 nähdään puun palamisen eri vaiheet. Pystyakselilla on palamisproses-

sin lämpötilatasot. Aluksi prosessi on endoterminen eli lämpöä kuluttava, joten tarvitaan muualta tuotua lämpöenergiaa eli aktivoitumisenergiaa kosteuden haihtumiseen ja syttymiseen. Syttymisvaiheen jälkeen prosessi tuottaa energiaa enemmän kuin kuluttaa. (2; 4, s. 41–44.)



KUVA 1. Puun palamisen vaiheet (4, s. 42)

Kosteuden haihtuminen

Kosteuden haihtuminen puusta alkaa, kun lämpötila on noussut n. 100 °C:seen. Lämpenemisnopeudesta riippuen kosteus voi edetä puun sisällä nesteinä tai kaasuna. Paine voi nousta puun sisällä korkeammaksi kuin vallitseva ilmanpaine. (4, s. 42–44.)

Pyrolyysi

Pyrolyysi tarkoittaa lämpöenergian aiheuttamia hajoamisreaktioita, joissa puun sisältämät alkuaineyhdisteet muuttuvat toisenlaisiksi yhdisteiksi. Nämä syntyneet pyrolyysituotteet palavat puun pinnalla ja edelleen vahvistavat hajoamisreaktioita. (4, s. 42–44.)

Syttyminen

Puu syttyy palamaan yleensä noin 270 °C:ssa, jolloin lämmöntuotto ylittää yhteenlasketut lämpöhäviöt ja kaasujen pitoisuudet ovat riittävän suuret. Tämä havaitaan näkyvänä liekinä puun pinnalla. Kaasut voivat palaa hetkellisesti jo 180 °C:ssa ja jonkin aikaa jopa itsenäisesti 225 °C:ssa. (4, s. 42–44.)

Jäännöshiilen palaminen

Pyrolyysivaiheen jälkeen puun kaasuuntuvat aineet ovat poistuneet, ja jäljellä on kiinteässä olomuodossa oleva hiili. Palamisreaktio tapahtuu hiilen pinnan läheisyydessä ilman liekkiä, kun lämpötila on riittävän korkea ja happea on saatavilla tarpeeksi. Jäännöshiilen palaminen on hidas vaihe, ja vaatii enemmän arinan pohjapinta-alaa kuin pyrolyysivaihe. Jäännöshiilellä on korkea lämpöarvo, ja sen palamisella onkin suuri merkitys kokonaislämmöntuotossa. Jäännöshiilen palamisesta saatavan lämpötehon suuruus on 25–50 % kokonaislämmöntuotosta. (4, s. 42–44; 5, s. 7.)

2.2 Panospolttoprosessi

Työssä tarkasteltavan yläpalokaminan polttoprosessi on panostyyppinen, jossa tulipesään syötetään kerralla koko poltettava määrä puita. Puut palavat tietyllä reaktionopeudella, johon vaikuttaa mm. lämpötila ja polttopuun kosteus.

Tulipesään syötetään paloilmaa ensiöilmana arinan pohjan kautta sekä toisioilmana suuluukun yläosan aukoista. Polttoilman määrää tulee säädellä palamisen vaiheiden mukaan jatkuvasti, jotta saavutetaan mahdollisimman puhdas palamisprosessi. Polttoprosessin alussa kaikki ilma-aukot voidaan pitää täysin auki. Palovaiheessa ensiöilman tulisi olla 2/3 ja toisioilman 1/3 paloilmasta. Loppuvaiheessa toisioilmaa rajoitetaan paljon tai suljetaan kokonaan, ja ensiöilmaa vähennetään. Panospolttoprosessissa palamisilman tarpeeseen vaikuttavat myös käytettävän polttopuun kosteus, palakoko sekä panoskoko eli tulisi- jaan syötetyn puun määrä. (4, s. 44; 6, s. 15–16.)

2.3 Adiabaattinen palamislämpötila

Adiabaattisella palamislämpötilalla tarkoitetaan teoreettisesti saavutettavissa olevaa korkeinta lämpötilaa, kun polttoaine palaa tulipesässä eikä lämpöä siirry ympäristöön vaan kaikki vapautuva lämpö kuluu savukaasujen lämmittämiseen. Massataseen mukaisesti palotilaan tuodaan sekä polttoaineen massavirta \dot{m}_{pa} , jonka tehollinen lämpöarvo on H_u , että palamisilman massavirta \dot{m}_i lämpötilassa t_i . Palotilasta poistuu savukaasun massavirta \dot{m}_{sk} adiabaattisessa lämpötilassa t_{sk} . (2, s. 95.)

3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpötilaerot pyrkivät aina tasoittumaan eli lämpöenergia siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpöenergia voi siirtyä aineesta toiseen kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä tai konvektiolla. (7, s. 216; 8.)

3.1 Johtuminen

Lämmön johtumista eli konduktiota voi tapahtua kiinteässä, nestemäisessä tai kaasumaisessa väliaineessa. Lämpövirta konduktiossa on suoraan verrannollinen väliainemateriaalille ominaiseen lämmönjohtavuuteen, lämmönsiirtopinta-alaan ja lämpötilaeroon sekä kääntäen verrannollinen lämmönsiirtopinnan pak-suuteen. (3, s. 204–205.)

Eri materiaalien lämmönjohtavuus vaihtelee paljon, ja yleisesti metallit johtavat lämpöä hyvin ja kaasut huonommin. Tässä työssä kaminan materiaalina käytetävän alumiinin lämmönjohtavuus on 210 W/mK, kun taas ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus on 20 W/mK ja ilman vain 0,026 W/mK. (3, s. 204–205; 8.)

3.2 Säteilylämmönsiirto

Lämpösäteilyksi kutsutaan sähkömagneettista säteilyä, jonka aiheuttaa kappaleen lämpötila. Jokainen pinta lähettää lämpösäteilyä eikä säteilylämmönsiirrossa tarvita väliainetta. Jos kappaleen lämpötila on sama kuin ympäristön lämpötila, kappale säteilee yhtä paljon lämpöä ympäristöön kuin ympäristö kappaleeseen. (3, s. 206; 8.)

Kappaleen ympäristöön säteilemä lämpövirta riippuu kappaleelle ominaisesta säteilyluvusta, kappaleen lämpötilasta sekä kappaleen pinta-alasta. Säteilyluku riippuu mm. kappaleen pinnan laadusta ja kemiallisista ominaisuuksista. Tumma karhea pinta lähettää lämpösäteilyä enemmän kuin vaalea kiiltävä pinta. Lämmityskattiloiden eristeiden suojaksi valitaankin usein kirkasta peltiä säteilylämpöhäviöiden pienentämiseksi. (3, s. 206; 8.)

Mitä kuumempi kappaleen pinta on, sitä lyhytaaltoisempaa on sen lähettämä lämpösäteily ja sitä suurempi merkitys säteilylämmönsiirrolla on. Kaminassa lämpösäteilyalueet sijaitsevat lähinnä tulipesässä. (3, s. 206; 8.)

3.3 Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy fluidin eli virtaavan nesteen tai kaasun välityksellä. Vapaa konvektio aiheutuu lämpötilaeroista. Kuumempi, tiheydeltään pienempi, aine nousee ylöspäin. Liikellepaneva voima on siis noste. Aineen jäähtyessä sen tiheys kasvaa, ja se laskeutuu alaspäin. Pakotetussa konvektiossa fluidin virtausta tehostetaan esimerkiksi pumpun tai puhaltimen avulla. Tällöin lämmönsiirto pinnan ja fluidin välillä on huomattavasti tehokkaampaa kuin vapaassa konvektiossa. (8.)

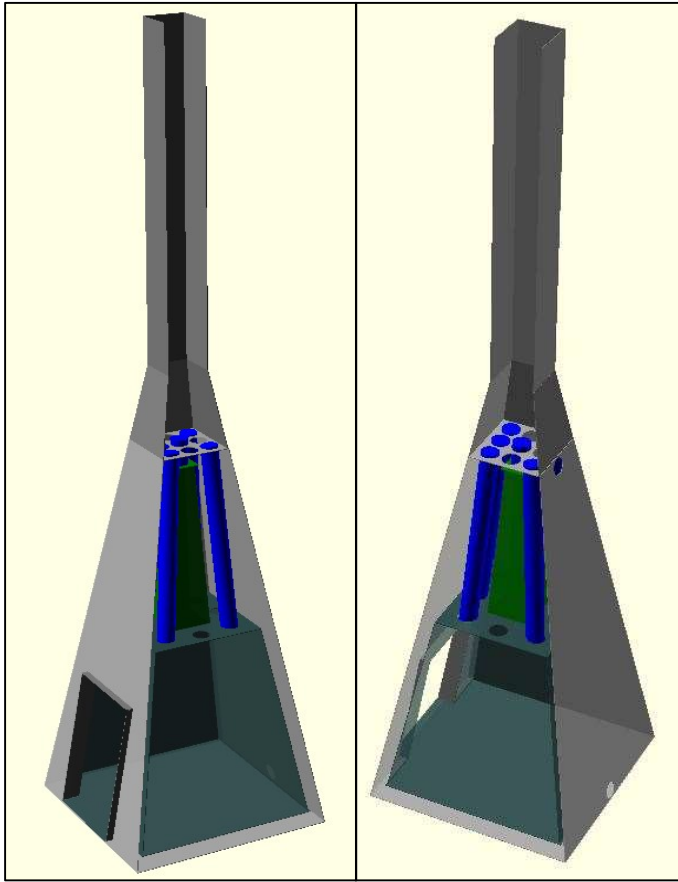
Konvektiossa virtaavasta fluidista kiinteään levyyn siirtyvä lämpövirta on suoraan verrannollinen lämmönsiirtymiskertoimeen, kiinteän levyn pinta-alaan sekä fluidin ja levyn väliseen lämpötilaeroon. Lämmönsiirtymiskerroin riippuu mm. virtaavan aineen laadusta, virtausnopeudesta, pinnankarheudesta ja paineesta. (3, s. 205; 8.)

4 YLÄPALOKAMINAN RAKENNE JA TOIMINTA

Kuvassa 2 nähdään tilaajan suunnittelukuva yläpalokaminan rakenteesta etu- ja takaviistosta katsottuna. Katkaistu pyramidi (tumman vihreä) on kaminan tulipesä, jossa poltetaan polttoaineena puuta. Etuseinämässä on tulipesän luukku, jonka kautta syötetään polttoaine ja palamisilma. Tulipesän yläpuolella on kahdeksan pyöreää putkea (siniset), joista kaikkia ei ole piirretty kuvaan sekä keskellä yksi alaosastaan neliskulmainen (vihreä) ja yläosastaan pyöreä (sininen) putki. Kaikissa näissä putkissa virtaa savukaasu tulipesästä ylöspäin kohti piippua.

Vesi syötetään sisään kaminan takaseinän alaosassa sijaitsevasta aukosta. Vesi virtaa vesivaipassa ensin tulipesän alta ja sen jälkeen tulipesän seinämien vierestä ylöspäin, kunnes tulee varsinaiseen lämmönsiirtimeen, jossa se ympäröi savukaasuputket. Vesi poistuu kaminan takaseinästä putkiosan yläreunassa sijaitsevasta aukosta. Vesi syötetään kaminaan pumpun avulla, joten laskuissa oletetaan, että konvektiivinen lämmönsiirto vesipuolella tapahtuu pakotetulla konvektiolla.

Kaminan ulkokuori (harmaa) eristetään ulkopuolelta hyvin, joten laskuissa oletetaan, että ulkokuoren kautta ei tapahdu lämpöhäviötä. Materiaalina kaikissa kaminan osissa käytetään 2 mm vahvuista alumiinia.



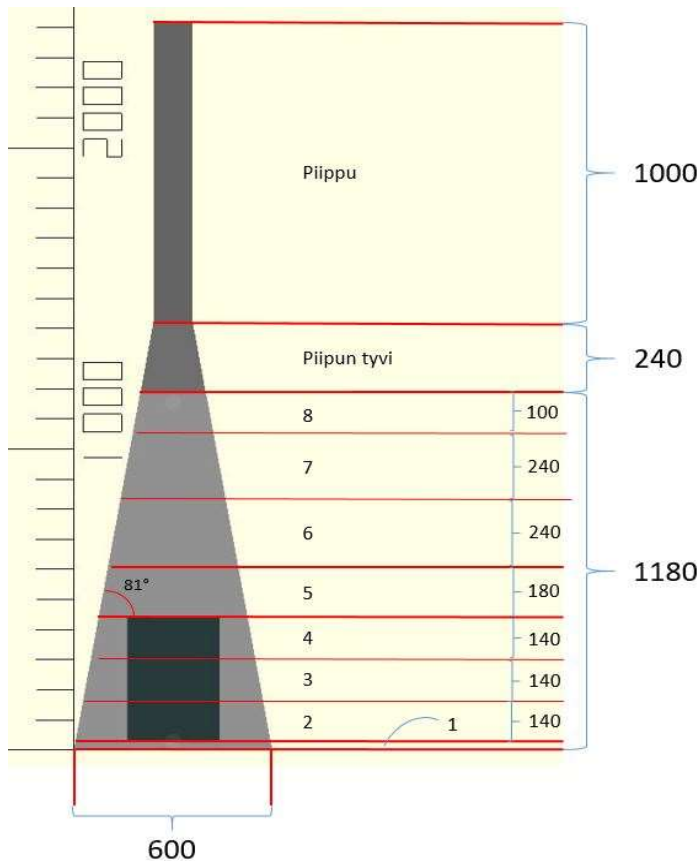
KUVA 2. Tilaajan suunnittelukuva yläpalokaminan rakenteesta (9)

5 LÄMPÖTEKNINEN LASKENTA

Tässä työssä tarkasteltavan yläpalokaminan hyötysuhteen selvittäminen aloitettiin laskemalla savukaasulasku. Savukaasulaskun tulosten perusteella laskettiin savukaasulle virtausteknisiä arvoja eri lämpötiloissa, sillä lämpötila vaihtelee kaminan eri osissa paljonkin.

Kamina on kolmiulotteiselta muodoltaan pyramidin mallinen, mutta se jaettiin laskemisen helpottamiseksi useampaan osaan, joita käsitellään laskuissa erillisinä lämmönsiirtiminä. Tällöin voidaan laskuissa olettaa näiden pienten osien olevan pystysuorassa.

Kuvassa 3 nähdään kaminan jako eri lämmönsiirrinosiin. Lämmönsiirrin 1 on tulipesän pohja. Lämmönsiirtimet 2–4 ovat määräytyneet niin, että tulipesän luukun korkeus jaettiin kolmeen yhtä korkeaan osaan. Lämmönsiirrin 5 alkaa luukun yläreunasta ja päättyy tulipesän yläreunaan. Lämmönsiirtimet 6–8 käsitävät putkisto-osuuden niin, että 6 ja 7 ovat yhtä korkeat osat siltä osin, kun keskimäinen putki on poikkipinta-alaltaan neliö, ja lämmönsiirrin 8 on putkisto-osuuden viimeinen osa, jossa kaikki putket ovat poikkipinta-alaltaan pyöreitä.



KUVA 3. Kaminan jako erillisiin lämmönsiirtimiin

Jokaiselle lämmönsiirinosalle laskettiin konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, säteilyn lämmönsiirtokerroin sekä lämmönjohtumiskerroin. Näiden avulla selvitetiin, kuinka paljon lämpöä siirtyy kussakin lämmönsiirinosassa. Lopuksi laskettiin hyödyksi saatava energia, ja sen avulla koko kaminan hyötysuhde.

Ensimmäisessä alaluvussa on esitelty työssä tarvittavat laskentakaavat.

5.1 Laskentakaavat

Polttoaineen palamiseen tarvittava teoreettinen kuiva ilmamäärä lasketaan kaavalla 1 (3, s. 85).

$$\frac{N_{i(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}} = \frac{N_{O_2(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}} * \frac{1}{0,21} \quad \text{KAAVA 1}$$

$\frac{N_{O_2(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}}$ = palamisen reaktioyhtälöiden perusteella saatu hapen teoreettinen määrä polttoainekiloa kohti

Savukaasun tiheys normaalitilassa lasketaan kaavalla 2 (3, s. 99).

$$\rho_{sk} = \sum x_n * \rho_n \quad \text{KAAVA 2}$$

ρ_n = kaasukomponentin n tiheys

x_n = komponentin n mooliosuus

Savukaasun tiheys tietyssä lämpötilassa lasketaan kaavalla 3 (3, s. 99).

$$\rho_x = \rho_0 * \frac{T_0}{T_x} \quad \text{KAAVA 3}$$

ρ_0 = tiheys normaalitilassa ($T_0 = 273,15$ K)

T_0 = normaalitilan lämpötila 273,15 K

T_x = lämpötila (K), jossa tiheys halutaan selvittää

Savukaasun ominaislämpökapasiteetti lasketaan kaavalla 4 (3, s. 97).

$$c_{psk} = \sum x_j * c_{pj} \quad \text{KAAVA 4}$$

x_j = kaasukomponentin j massaosuus

c_{pj} = kaasukomponentin j ominaislämpö (kJ/kgK)

Polttoaineen lämpöarvo lasketaan kaavalla 5 (3, s. 44).

$$H_u (kosteaa) = 34,8 * m_{hiili} + 93,8 * m_{vety} + 10,5 * m_{riikki} + 6,3 * m_{typpi} - 10,8 * m_{happi} - l_{25} * m_{vesi} \quad \text{KAAVA 5}$$

$H_u (kosteaa)$ = kostean polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg)

m_x = polttoainekomponentin massaosuus (kg/kg_{pa})

l_{25} = veden höyrystymislämpö (2443 kJ/kg, kun $t = 25$ °C)

Adiabaattinen palamislämpötila lasketaan kaavalla 6 (3, s. 95).

$$t_{sk} = \frac{H_u + c_{pi} * t_i * \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}}}{c_{psk} * \frac{\dot{m}_{sk}}{\dot{m}_{pa}}} \quad \text{KAAVA 6}$$

H_u = polttoaineen tehollinen lämpöarvo (kJ/kg_{pa})

c_{pi} = ilman keskimääräinen ominaislämpö (kJ/kgK) lämpötilavälillä t_0 – t_{sk} (°C)

c_{sk} = savukaasun keskimääräinen ominaislämpö (kJ/kgK) lämpötilavälillä t_0 – t_{sk} (°C)

t_i = ilman sisäänmenolämpötila (°C)

$$\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}} = \lambda * \frac{\dot{m}_{i(teor)}}{\dot{m}_{pa}} = \text{todellinen ilmavirta polttoainekiloa kohti (kg/kg}_{pa})$$

$$\frac{\dot{m}_{sk}}{\dot{m}_{pa}} = \frac{\dot{m}_{sk(teor)}}{\dot{m}_{pa}} + (\lambda - 1) * \frac{\dot{m}_{i(teor)}}{\dot{m}_{pa}} = \text{todellinen savukaasuvirta polttoainekiloa kohti (kg/kg}_{pa})$$

Savukaasun dynaaminen viskositeetti lasketaan kaavalla 7 (3, s. 98).

$$\eta = \frac{\frac{\sum \eta_n * x_n}{\sqrt{M_n}}}{\frac{\sum x_n}{\sqrt{M_n}}} \quad \text{KAAVA 7}$$

x_n = kaasukomponentin n mooliosuus

M_n = kaasukomponentin n moolimassa

Savukaasun kinemaattinen viskositeetti lasketaan kaavalla 8 (10, s. 16).

$$\nu = \frac{\eta_{sk}}{\rho_{sk}} \quad \text{KAAVA 8}$$

η_{sk} = savukaasun dynaaminen viskositeetti (kg/m*s)

ρ_{sk} = savukaasun tiheys (kg/m³)

Savukaasun lämmönjohtavuus lasketaan kaavalla 9 (3, s. 97).

$$\lambda_{sk} = 0,5 * \left(\sum x_n * \lambda_n + \frac{1}{\sum \frac{x_n}{\lambda_n}} \right) \quad \text{KAAVA 9}$$

x_n = komponentin n mooliosuus

λ_n = komponentin n lämmönjohtavuus

Prandtin luku lasketaan kaavalla 10 (11, s. 733).

$$Pr = \frac{\eta * c_p}{\lambda} \quad \text{KAAVA 10}$$

Savukaasun Prandtin luku lasketaan kaavalla 11 (10, s. 17).

$$Pr_{sk} = \sum (x_n * Pr_n) \quad \text{KAAVA 11}$$

x_n = komponentin n mooliosuus (%)

Pr_n = kaasukomponentin n Prandtin luku

Savukaasuteho lasketaan kaavalla 12 (12, s.19)

$$\dot{Q}_{sk} = \dot{m}_{sk} * (c_{psk1} * T_{sk1} - c_{psk2} * T_{sk2})$$

KAAVA 12

\dot{Q}_{sk} = savukaasujen luovuttama teho (kW)

\dot{m}_{sk} = savukaasun massavirta (kg/s)

c_{psk} = savukaasun ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 13 (8).

$$Re = \frac{v_d * L}{\nu} = \frac{v_d * d}{\nu} = \frac{v_d * d_h}{\nu}$$

KAAVA 13

v_d = virtausnopeus (m/s)

L = pituus (m)

d = halkaisija (m)

d_h = hydraulinen halkaisija (m)

ν = kinemaattinen viskositeetti (m²/s)

Hydraulinen halkaisija lasketaan kaavalla 14 (13).

$$d_h = 4 * r_h$$

KAAVA 14

$$\text{jossa } r_h = \frac{A}{p}$$

r_h = hydraulinen säde (m)

A = virtauksen poikkipinta-ala (m²)

p = fluidin kostuttama piiri (m)

Nusseltin luku pakotetussa konvektiossa turbulentsille virtaukselle, kun $10^4 < Re_d < 10^6$, $0,6 < Pr < 50$ ja $L > d$ lasketaan kaavalla 15 (14, s. 170).

$$Nu_{d,turb} \approx 0,0235 * Re_d^{0,8} * Pr^{0,48} * f_6 * f_{2,3}$$

KAAVA 15

Re = Reynoldsin luku

Pr = Prandtlin luku

$$f_2 = \left(\frac{Pr}{Pr_W} \right)^{0,11} \text{ (Nesteet)}$$

$$f_3 = \left(\frac{T}{T_W} \right)^{0,45} \text{ (Kaasut)}$$

$$f_6 = 1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}$$

Konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin lasketaan kaavalla 16 (14, s. 170).

$$\alpha_k = \frac{Nu * \lambda}{L} \quad \text{KAAVA 16}$$

Nu = Nusseltin luku

λ = lämmönjohtavuus

L = pituus

Lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla 17 (8).

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{k_sk}} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{k_vesi}}} \quad \text{KAAVA 17}$$

α_{k_sk} = savukaasupuolen konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin

α_{k_vesi} = vesipuolen konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin

s = lämmönsiirtopinnan paksuus

λ = lämmönsiirtopinnan lämmönjohtavuus

Lämpökapasiteettivirta lasketaan kaavalla 18 (8).

$$C = q_v * \rho * c_p \quad \text{KAAVA 18}$$

q_v = tilavuusvirta

ρ = tiheys

c_p = ominaislämpökapasiteetti

Dimensioton konduktanssi lasketaan kaavalla 19 (8).

$$z = \frac{k_a * A}{C_{min}} \quad \text{KAAVA 19}$$

k_a = lämmönläpäisykerroin

A = lämmönsiirtopinta-ala

C_{min} = lämpökapasiteettivirta

Lämmönsiirtimen rekuperaatioaste lasketaan kaavalla 20 (8).

$$E = 1 - \frac{e^{-z(1+R)}}{1+R}$$

KAAVA 20

e = Neperin luku

z = dimensioton konduktanssi

$$R = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Savukaasun loppulämpötila lämmönsiirtimen jälkeen lasketaan kaavalla 21 (8).

$$T_1'' = T_1' - E * (T_1' - T_2')$$

KAAVA 21

T_1' = savukaasun lähtölämpötila

T_2' = veden lähtölämpötila

E = rekuperaatioaste

Veden loppulämpötila lämmönsiirtimen jälkeen lasketaan kaavalla 22 (8).

$$T_2'' = R * (T_1' - T_1'') + T_2'$$

KAAVA 22

Lämmönsiirtoteho lasketaan kaavalla 23 (8).

$$Q_{ls} = \dot{m}_{vesi} * (c_{p2} * T_2 - c_{p1} * T_1)$$

KAAVA 23

\dot{m}_{vesi} = veden massavirta

c_{p2} = veden ominaislämpö loppulämpötilassa

c_{p1} = veden ominaislämpö lähtölämpötilassa

T_2 = veden loppulämpötila

T_1 = veden lähtölämpötila

Hyötysuhde suoralla menetelmällä lasketaan kaavalla 24 (7).

$$\eta = \frac{Q_{ls}}{Q_{pa}}$$

KAAVA 24

Nusseltin luku pakotetussa konvektiossa pystysuoralla pinnalla lasketaan kaavalla 25 (8).

$$Nu = 0,057 * (Re * Pr)^{0,78}$$

KAAVA 25

Re = Reynoldsin luku

Pr = Prandtlin luku

Säteilyn lämmönsiirtymiskerroin α_{str} lasketaan kaavalla 26 (14, s. 139).

$$\alpha_{str} = f_{str} * \varepsilon_1 * \varepsilon_2 * \varphi_{12} * C_s \quad \text{KAAVA 26}$$

f_{str} = lämpötilakerroin (K)

ε_1 = aineen 1. emissiviteetti

ε_2 = aineen 2. emissiviteetti

φ_{12} = näkyvyyskerroin

$C_s = 5,67$ (Stefan-Boltzmanin vakio * 10^8) (W/m^2K^4)

Lämpötilakerroin f_{str} lasketaan kaavalla 27 (14, s. 139).

$$f_{str} = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \quad \text{KAAVA 27}$$

T_1 = lämpötila alussa (K)

T_2 = lämpötila lopussa (K)

Ekvivalentti kerrospaksuus s_{gl} lasketaan kaavalla 28 (14, s. 131).

$$s_{gl} = f * \frac{4 * V_g}{A_g} \quad \text{KAAVA 28}$$

V_g = kaasumassan tilavuus (m^3)

A_g = kaasumassan pinta-ala (m^2)

f = geometria- ja painekerroin ($f \approx 0,9$)

Savukaasujen likimääräinen emissiivisyys ε_g lasketaan kaavalla 29. Vesihöyry ja hiilidioksidi ovat säteileviä savukaasukomponentteja. Näiden säteilyvyöt menevät osittain päällekkäin, mikä aiheuttaa 2...7 % heikentymisen yksittäissäteilyjen summaan. Heikennystekijä huomioidaan kertoimella 0,95. (14, s. 133.)

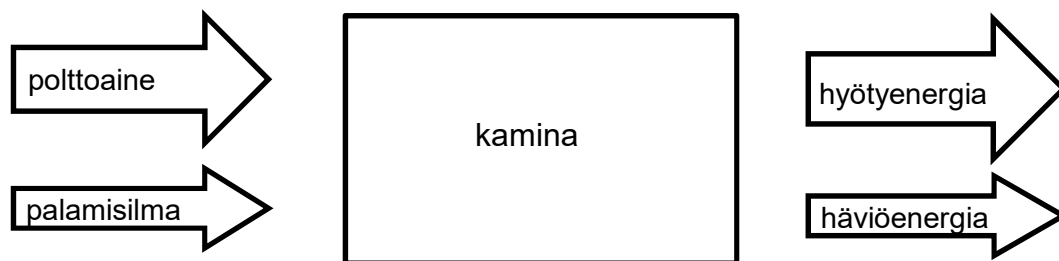
$$\varepsilon_g \approx 0,95 * (\varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2}) \quad \text{KAAVA 29}$$

ε_{H_2O} = vesihöyryn emissiivisyys

ε_{CO_2} = hiilidioksidin emissiivisyys

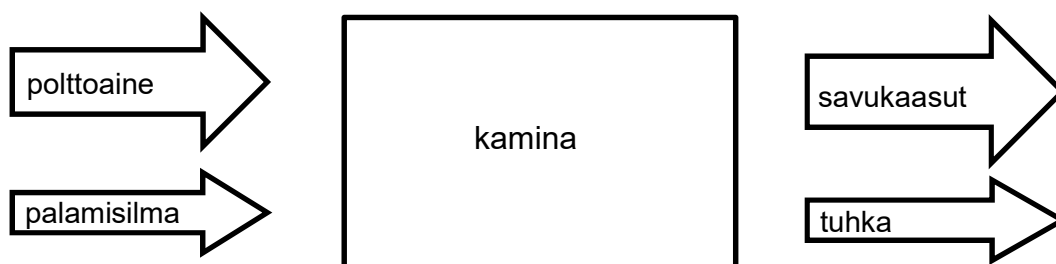
5.2 Energia- ja massatase

Kuvassa 4 nähdään kaminan energiatase. Kaminaan syötetään polttoainetta ja palamisilmaa. Polttoaineen sisältämät alkuaineet reagoivat kemiallisesti palamisilmassa olevan hapen kanssa eli palavat, jolloin muodostuu lämpöä eli hyötyenergiaa, jota käytetään veden lämmittämiseen. Kaikkea prosessissa muodostuvaa energiaa ei saada hyödynnettyä, vaan tämä häviöenergiaksi kutsuttu osa menee esimerkiksi savukaasujen mukana ulkoilmaan. (3, s. 95)



KUVA 4. Kaminan energiatase

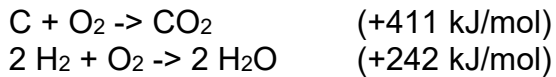
Kuvassa 5 nähdään kaminan massatase, jonka mukaisesti palotilaan tuodaan sekä polttoaineen massavirta \dot{m}_{pa} , että palamisilman massavirta \dot{m}_i . Palotilasta poistuu savukaasun massavirta \dot{m}_{sk} sekä jonkin verran tuhkaa. Tuhkan massavirta on kuitenkin niin häviävän pieni, että se on tässä työssä oletettu nolllaksi. (3, s. 95)



KUVA 5. Kaminan massatase

5.3 Savukaasun koostumus ja ominaisuudet

Tulipesässä tapahtuu palamisen kemiallinen reaktio, jossa polttoaineena käytetävän puun alkuaineet reagoivat hapen kanssa luovuttaen lämpöä seuraavien reaktioyhtälöiden mukaisesti:



Savukaasulaskua varten arvioitiin polttoaineen kuiva-ainekoostumus ja kosteusprosentti sekä poltossa käytettävä ilmakerroin useamman lähteen perusteella. Taulukosta 2 nähdään laskuissa käytetyt arvot polttoaineen koostumuksesta. Taulukkoon on myös laskettu jokaisen komponentin ainemäärä jakamalla massaosuus komponentin moolimassalla. Viimeisestä sarakkeesta nähdään jokaista komponenttia kohden tarvittava hapen määrä, joka määräytyy palamisen reaktioyhtälöiden perusteella.

TAULUKKO 2. Polttoaineen lähtötiedot sekä hapen tarve

	m-%		komponentin moolimassa M (kg/kmol)	ainemäärä kosteassa polttoaineessa n (kmol/kg _{pa})	hapen tarve O ₂ (kmol/kg _{pa})
	kuiva polttoaine	kosteaa polttoaine			
Polttoaineen komponentti					
C	0,504	0,4032	12,01	0,033572023	0,033572023
H₂	0,062	0,0496	2,016	0,024603175	0,012301587
O₂	0,425	0,34	32	0,010625	-0,010625
N₂	0,005	0,004	28,02	0,000142755	0
H₂O	-	0,2	18,016	0,011101243	-
yht.	0,996	1,00	92,062	0,080044196	0,035248611

Taulukon 2 viimeisestä sarakkeesta nähdään yhteenlaskettu teoreettinen hapen tarve. Ilma sisältää 21 % happea ja 79 % typpeä, joten kaavan 1 avulla voidaan laskea teoreettinen palamisilman määrä polttoainekiloa kohden:

$$\frac{N_{i(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}} = 0,035248611 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} * \frac{1}{0,21} = 0,16785053 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}}$$

Teoreettisen ilmamäärän typpimäärä lasketaan vähentämällä hapen osuus teoreettisesta ilmamäärästä:

$$\frac{N_{N_2(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}} = (0,16785053 - 0,035248611) \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} = 0,13260192 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}}$$

Teoreettinen ilmamäärä saadaan muutettua kilogrammoiksi polttoainekiloa kohden laskemalla yhteen typen ja hapen tulot omilla moolimassoillaan:

$$\begin{aligned} \frac{m_i}{m_{pa}} &= 32,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} * 0,035248611 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} + 28,02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} * 0,13260192 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} \\ &= 4,84346123 \frac{\text{kg}_{ilmaa}}{\text{kg}_{pa}} \end{aligned}$$

Edelleen kuutiometreiksi ilmamäärä saadaan kertomalla moolimäärä ilman moolitilavuudella:

$$\frac{V_i}{m_{pa}} = 22,41 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pa}} * 0,16785053 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} = 3,761530304 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pa}}$$

Taulukkoon 3 on laskettu syntyvän teoreettisen savukaasun jokaisen komponentin ainemäärä. Reaktiotuotteiden ainemäärät määräytyvät aiemmin mainittujen palamisreaktioyhtälöiden perusteella suhteessa polttoaineen komponenttien ainemääriin. Seuraaviin sarakkeisiin on laskettu sekä kosteiden että kuivien savukaasujen komponenttien mooliosuudet savukaasuissa. Jokaisen komponentin määrä on saatu kilogrammoiksi kertomalla komponentin ainemäärä sen moolimassalla. Savukaasun tilavuuskoostumus on saatu kertomalla komponentin ainemäärä sen moolitilavuudella. Komponenttien moolitilavuuksien arvot saatiin taulukosta Höyrykattilatekniikka-kirjasta (3, s. 85).

TAULUKKO 3. Savukaasulaskun ensimmäiset vaiheet

Teoreettinen savukaasu	Syntyvä kostea savukaasu (kmol/kg _{pa})	Syntyvä kuiva savukaasu (kmol/kg _{pa})	Mooliosuus kosteassa savukaasussa (%)	Mooliosuus kuivassa savukaasussa (%)	Kostean savukaasun massa-koostumus (kg/kg _{pa})	Tilavuus-koostumus (m ³ /kg _{pa})	Massaosuus savukaasussa (%)
CO ₂	0,03357202	0,0336	16,6236	20,1938	1,4775	0,7473	0,2531
H ₂ O	0,03570442		17,6795		0,6433	0,8001	0,1102
N ₂	0,13267753	0,1327	65,6969	79,8062	3,7176	2,9720	0,6368
O ₂	-	-	-	-	-	-	-
yht.	0,20195397	0,1662	100,0	100,0	5,8384	4,5194	1,0000

Palamisessa syntyvän todellisen savukaasun koostumus on laskettu taulukkoon 4. Työn laskuissa oletetaan, että polttoainetta poltetaan reilulla ilmakertoimella eli ilmakerron $\lambda=2$. Oletetaan, että ilmaylimäärä siirtyy suoraan savukaasuihin eli muodostuva todellinen savukaasu on ilmaylimäärän ja teoreettisen savukaasun summa. Savukaasun määrät on laskettu kilogrammoiksi kertomalla kaasukomponenttien ainemäärät moolimassoilla. Edelleen kuutiometreiksi arvot on saatu kertomalla ainemäärät komponenttien moolitilavuuksilla.

TAULUKKO 4. Todellisen savukaasun määrä

Todellinen savukaasu	Määrä kosteassa savukaasussa $\lambda=1$ (kmol/kg _{pa})	ilmaylimäärä (kmol/kg _{pa})	Syntyvän todellisen savukaasun määrä		
			(kmol/kg _{pa})	(kg/kg _{pa})	(m ³ /kg _{pa})
CO ₂	0,03357202		0,03357202	1,47750475	0,74731324
H ₂ O	0,03570442		0,03570442	0,64325079	0,80013601
N ₂	0,13267753	0,13260192	0,26527945	7,43313011	5,94225962
O ₂		0,03524861	0,03524861	1,12795554	0,78921639
yht.	0,20195397	0,16785053	0,36980450	10,68184119	8,27892525

Taulukkoon 5 on laskettu edellisen taulukon tietojen perusteella syntyvän todellisen savukaasun komponenttien mooli- ja massaosuudet. Lisäksi taulukkoon on merkitty jokaisen komponentin normaalitiheys, joiden perusteella alimmalle riville on laskettu normaalitilaisen savukaasun tiheys kaavan 2 avulla.

TAULUKKO 5. Todellisen savukaasun mooli- ja massaosuudet sekä komponenttien normaalitiheydet

Todelliset savukaasut	Mooliosuus savukaasuissa	Mooliosuus savukaasuissa (%)	Massaosuus savukaasuissa	Massaosuus savukaasuissa (%)	Komponenttien normaalitiheys kg/m ³
CO ₂	0,09078317	9,0783	0,1383	13,8319	1,9770
H ₂ O	0,09654944	9,6549	0,0602	6,0219	0,8020
N ₂	0,71735051	71,7351	0,6959	69,5866	1,2505
O ₂	0,09531688	9,5317	0,1056	10,5596	1,4290
yht.	1,00	100,00	1,00	100,00	1,2902

Taulukkoon 6 on laskettu aiemmin lasketun normaalitilaisen savukaasun tiheyden perusteella savukaasun tiheys eri lämpötiloissa kaavan 3 avulla. Lisäksi taulukkoon on laskettu savukaasun tilavuusvirran arvot eri lämpötiloissa. Tilavuusvirta 0 °C:ssa on laskettu ensin kertomalla todellisen savukaasun tilavuus (taulukko 4) polttoaineen palamisnopeudella, jonka oletetaan tässä työssä olevan 5 kg/h. Lämpötilan kasvaessa paine kasvaa, mutta massavirran täytyy pysyä samana. Tällöin siis tilavuusvirran täytyy kasvaa. Muissa lämpötiloissa tilavuusvirran arvojen laskemisen helpottamiseksi taulukkoon on ensin laskettu kerroin, joka ilmaisee savukaasun tiheyden muutoksen suhteen eri lämpötilojen välillä.

TAULUKKO 6. Savukaasun tiheys ja tilavuusvirta eri lämpötiloissa

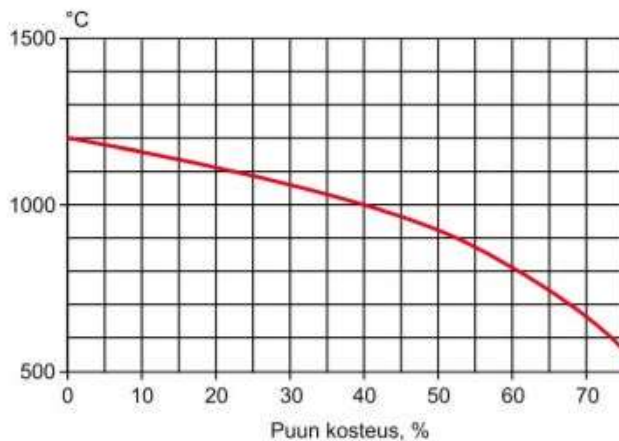
Lämpötila	Savukaasun tiheys	kerroin	Savukaasun tilavuusvirta	
			q_v m ³ /h	q_v m ³ /s
T °C	ρ_{sk} kg/m ³	x		
0	1,29016561		41,39462627	0,01149851
100	0,94441575	1,36609921	56,54916637	0,01570810
200	0,74481398	1,73219843	71,70370646	0,01991770
300	0,61486301	2,09829764	86,85824656	0,02412729
400	0,52352185	2,46439685	102,01278665	0,02833689
500	0,45580901	2,83049606	117,16732675	0,03254648
600	0,40360618	3,19659528	132,32186685	0,03675607
700	0,36213198	3,56269449	147,47640694	0,04096567
800	0,32838721	3,92879370	162,63094704	0,04517526
900	0,30039529	4,29489292	177,78548713	0,04938486
1000	0,27680064	4,66099213	192,94002723	0,05359445
1100	0,25664256	5,02709134	208,09456733	0,05780405
1200	0,23922122	5,39319055	223,24910742	0,06201364
1300	0,22401471	5,75928977	238,40364752	0,06622324

Taulukkoon 7 on laskettu savukaasun ominaislämmön arvot eri lämpötiloissa. Kaasukomponenttien ominaislämpöjen arvot on saatu Höyrykattilatekniikka-kirjasta (3, s. 98). Kaasukomponenttien arvoja käyttäen kaavan 4 avulla on laskettu koko savukaasun ominaislämpö jokaisessa lämpötilassa.

TAULUKKO 7. Savukaasun ominaislämpö

Lämpötila	Savukaasun ominaislämpö c_p				
	O ₂ kJ/kgK	H ₂ O kJ/kgK	N ₂ kJ/kgK	CO ₂ kJ/kgK	SAVUKAASU kJ/kgK
T °C					
0	0,914	1,855	1,039	0,819	1,044509
100	0,925	1,867	1,043	0,871	1,056369
200	0,934	1,888	1,047	0,917	1,067730
300	0,950	1,909	1,051	0,959	1,079277
400	0,967	1,939	1,059	0,988	1,092457
500	0,980	1,968	1,068	1,022	1,106542
600	0,992	1,997	1,076	1,051	1,119134
700	1,005	2,031	1,084	1,072	1,131026
800	1,017	2,064	1,097	1,093	1,146231
900	1,026	2,102	1,110	1,114	1,161421
1000	1,038	2,131	1,120	1,130	1,173606
1100	1,043	2,165	1,130	1,147	1,185491
1200	1,051	2,194	1,139	1,160	1,196143
1300	1,059	2,227	1,147	1,172	1,206202

Seuraavaksi selvitetiin adiabaattinen palamislämpötila. Kuvassa 6 nähdään adiabaattisen palamislämpötilan kuvaaja puun kosteuspitoisuuden funktiona, kun ilmakerroin λ on 2 (4, s. 42). Työssä oletetaan polttopuun kosteuden olevan 20 %, joten tarkempaa laskua varten arvioitiin kuvaajasta adiabaattisen palamislämpötilan arvoksi 1110 °C.



KUVA 6. Puun kosteuden vaikutus liekin lämpötilaan, kun $\lambda=2$ (4, s. 42)

Kuvaajasta arvioidun adiabaattisen palamislämpötilan arvon avulla interpoloitiin savukaasun keskimääräinen ominaislämpö taulukosta 7 ja ilman vastaava arvo Principles of Engineering Thermodynamics -kirjan taulukosta A-20 (7, s. 851). Ilman sisäänmenolämpötilaksi on arvioitu 20 °C. Lisäksi adiabaattisen palamislämpötilan laskemista varten laskettiin polttoaineen lämpöarvo polttoainekilogrammaa kohti kaavalla 5, kun polttoaineen kosteus on 20 %.

$$H_{u(2\%)} = 34,8 * 0,4032 \frac{kg}{kg_{pa}} + 93,8 * 0,0496 \frac{kg}{kg_{pa}} + 6,3 * 0,004 \frac{kg}{kg_{pa}} - 10,8 * 0,34 \frac{kg}{kg_{pa}} - 2,443 \frac{MJ}{kg} * 0,2 \frac{kg}{kg_{pa}} = 14,5484 \frac{MJ}{kg} = 14\,548,4 \frac{kJ}{kg}$$

Adiabaattisen palamislämpötilan t_{sk} tarkempi arvo laskettiin kaavalla 6:

$$t_{sk} = \frac{14\,548,4 \frac{kJ}{kg} + 1,004326 \frac{kJ}{kgK} * 20\,^{\circ}C * \left(2 * 4,84346123 \frac{kg}{kg_{pa}}\right)}{1,113467512 \frac{kJ}{kgK} * \left(5,8384 \frac{kg}{kg_{pa}} * (2 - 1) * 4,84346123 \frac{kg}{kg_{pa}}\right)}$$

$$= 1239,55\,^{\circ}C$$

Taulukkoon 8 on laskettu savukaasun dynaamisen ja kinemaattisen viskositeetin arvot eri lämpötiloissa. Kaasukomponenteista hapen, typen ja hiilidioksidin dynaamiset viskositeetit saatiin kaasujen viskositeetilaskurista ja veden vastaavat arvot Steam Property -sovelluksesta. Savukaasun dynaaminen viskositeetti laskettiin taulukkoon 8 kaavalla 7 käyttäen lisäksi aiemmin laskettuja kaasukomponenttien arvoja. Savukaasun kinemaattinen viskositeetti laskettiin taulukkoon 8 kaavalla 8.

TAULUKKO 8. Savukaasun dynaaminen ja kinemaattinen viskositeetti

Lämpötila T °C	Dynaaminen viskositeetti η					Kinemaattinen viskositeetti ν
	O ₂ kg/ms	H ₂ O kg/ms	N ₂ kg/ms	CO ₂ kg/ms	SAVUKAASU kg/ms	SAVUKAASU kg/ms
0	0,0000191	0,0017900	0,0000165	0,0000138	0,00010086	7,817247E-05
100	0,0000244	0,0000122	0,0000209	0,0000185	2,6078E-06	2,761303E-06
200	0,0000290	0,0000162	0,0000248	0,0000227	3,2065E-06	4,305164E-06
300	0,0000332	0,0000203	0,0000282	0,0000265	3,7736E-06	6,137233E-06
400	0,0000370	0,0000245	0,0000313	0,0000301	4,3145E-06	8,241372E-06
500	0,0000404	0,0000286	0,0000342	0,0000337	4,8343E-06	1,060591E-05
600	0,0000437	0,0000326	0,0000369	0,0000364	5,3196E-06	1,318011E-05
700	0,0000467	0,0000366	0,0000394	0,0000393	5,7882E-06	1,598380E-05
800	0,0000496	0,0000404	0,0000418	0,0000421	6,2427E-06	1,901010E-05
900	0,0000523	0,0000441	0,0000440	0,0000447	6,6682E-06	2,219803E-05
1000	0,0000550	0,0000477	0,0000462	0,0000472	7,0877E-06	2,560580E-05
1100	0,0000575	0,0000511	0,0000482	0,0000496	7,4805E-06	2,914738E-05
1200	0,0000599	0,0000545	0,0000502	0,0000519	7,8678E-06	3,288930E-05
1300	0,0000623	0,0000578	0,0000521	0,0000541	8,2438E-06	3,680020E-05

Savukaasun lämmönjohtavuus eri lämpötiloissa on laskettu komponenttien lämmönjohtavuuksien perusteella taulukkoon 9 kaavalla 9. Kaasukomponenttien lämmönjohtavuuden arvot on luettu Tekniikan käsikirja 2:n kuvaajasta. (12, s. 756.)

TAULUKKO 9. Savukaasun lämmönjohtavuus

Lämpötila:	Lämmönjohtavuus λ				
T °C	O ₂ W/mK	H ₂ O W/mK	N ₂ W/mK	CO ₂ W/mK	SAVUKAASU W/mK
0	0,0242		0,0240	0,0149	0,0230
100	0,0317	0,0248	0,0306	0,0229	0,0293
200	0,0390	0,0334	0,0367	0,0312	0,0360
300	0,0462	0,0440	0,0425	0,0394	0,0427
400	0,0516	0,0547	0,0485	0,0470	0,0492
500	0,0570	0,0669	0,0535	0,0530	0,0550
600	0,0621	0,0799	0,0634	0,0619	0,0646
700	0,0680	0,0936	0,0636	0,0697	0,0670
800	0,0740	0,1077	0,0686	0,0775	0,0730
900	0,0800	0,1228	0,0742	0,0853	0,0796
1000	0,0850	0,1388	0,0800	0,0931	0,0862
1100	0,0910	0,1519	0,0842	0,1013	0,0915
1200	0,0967	0,1662	0,0891	0,1092	0,0974
1300	0,1024	0,1806	0,0939	0,1172	0,1032

Taulukkoon 10 on laskettu savukaasun Prandtlin luvut eri lämpötiloissa. Kaasukomponenttien Prandtlin luvut on saatu laskemalla komponenttien muiden ominaisarvojen avulla kaavalla 10. Savukaasun Prandtlin luku on laskettu komponenttien arvoista kaavalla 11.

TAULUKKO 10. Savukaasun Prandtlin luvut

Lämpötila:	Prandtlin luku				
T °C	O ₂	H ₂ O	N ₂	CO ₂	SAVUKAASU Pr
0	0,7220		0,7131	0,7602	0,6494
100	0,7117	0,9193	0,7122	0,7045	0,7314
200	0,6938	0,9162	0,7077	0,6662	0,7228
300	0,6828	0,8805	0,6979	0,6446	0,7092
400	0,6934	0,8666	0,6834	0,6327	0,6975
500	0,6946	0,8403	0,6827	0,6498	0,6961
600	0,6981	0,8150	0,6263	0,6180	0,6506
700	0,6902	0,7937	0,6715	0,6044	0,6790
800	0,6817	0,7747	0,6684	0,5937	0,6732
900	0,6707	0,7549	0,6582	0,5838	0,6620
1000	0,6716	0,7323	0,6468	0,5729	0,6507
1100	0,6591	0,7286	0,6468	0,5618	0,6482
1200	0,6511	0,7194	0,6420	0,5512	0,6421
1300	0,6443	0,7129	0,6363	0,5411	0,6358

Taulukkoon 11 on koottu veden lämpötilariippuvaisten suureiden arvoja lämmönsiirtolaskuja varten. Tiheyden arvot on saatu MAOL-taulukkokirjasta (15). Dynaamisen viskositeetin arvot on luettu Tekniikan käsikirja 2:n kuvaajasta (11, s. 202), ja kinemaattisen viskositeetin arvot on laskettu jakamalla dynaamisen viskositeetin arvo tiheydellä (kaava 8). Lämmönjohtavuuden arvot on luettu Tekniikan käsikirja 2:n kuvaajasta (11, s. 202), ja Prandtlin luvut on laskettu kaavalla 10. Ominaislämpöarvot on luettu Tekniikan käsikirja 2:n kuvaajasta (11, s. 203).

TAULUKKO 11. Veden lämpötilariippuvaisten suureiden arvoja

Lämpötila	Tiheys	Dynaaminen viskositeetti	Kinemaattinen viskositeetti	Lämmönjohtavuus	Prandtlin luku	Ominaislämpö
T °C	ρ kg/m ³	η kg/ms	ν kg/ms	λ W/mK	Pr	c_p kJ/kgK
0	999,84	0,00179	1,79029E-06	0,552	13,6779	4,218
10	999,70	0,00130	1,30039E-06	0,576	9,4611	4,192
20	998,20	0,00099	9,91785E-07	0,599	6,9118	4,182
30	995,65	0,00080	8,03495E-07	0,618	5,4084	4,178
40	992,22	0,00075	7,55881E-07	0,634	4,9424	4,178
50	988,05	0,00055	5,56652E-07	0,648	3,5478	4,18
60	983,22	0,00047	4,78021E-07	0,66	2,9795	4,184
70	977,79	0,00041	4,19313E-07	0,668	2,5711	4,189
80	971,81	0,00036	3,70443E-07	0,675	2,2384	4,197
90	965,32	0,00032	3,31496E-07	0,68	1,9788	4,205
100	958,36	0,00028	2,92166E-07	0,683	1,7284	4,216

5.4 Lämmönsiirto

Polttoaineen lämpöarvo polttoainekilogrammaa kohti on laskettu aiemmin. Polttoaineteho laskettiin kertomalla lämpöarvo palamisnopeudella, jonka oletetaan olevan 5 kg/h:

$$Q_{pa} = \frac{14\,548,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{3600 \text{ s}} = 20,2062 \text{ kW}$$

Savukaasun massavirta laskettiin kertomalla syntyvän savukaasun massa polttoainekiloa kohti (taulukko 4) polttoaineen palamisnopeudella:

$$\dot{m}_{sk} = \frac{10,68184119 \frac{kg}{kg_{pa}} * 5 \frac{kg}{h}}{3600 s} = 0,014835891 \frac{kg}{s}$$

Iteroidaan adiabaattinen palamislämpötila kaavalla 12, kun oletetaan että savukaasuteho on yhtä suuri kuin polttoaineesta saatava teho.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{sk} &= 0,014835891 \frac{kg}{s} * \left(1,1919 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * 1160 ^\circ C - 1,0469 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * 20 ^\circ C \right) \\ &= 20,2012 kW \end{aligned}$$

Puhdas ja jatkuva palaminen edellyttää reilun 500 °C:n lämpötilaa tulipesässä. Adiabaattinen palamislämpötila on teoreettisesti korkein saavutettavissa oleva lämpötila, mutta yläpalokaminassa palamisilma syötetään pelkästään luukun kautta, jolloin adiabaattisen palamislämpötilan saavuttaminen ei ole todennäköistä. Tämän perusteella oletetaan, että tulipesän pohjalla lämpötila on keskiarvo 500 °C:n ja adiabaattisen palamislämpötilan 1160 °C väliltä eli 830 °C.

Oletetaan, että vesi syötetään kaminaan 20 °C:n lämpötilassa ja että vesi vaihtuu vesivaipassa kerran kolmessa minuutissa. Lasketaan esimerkkilaskuna lämmönsiirto siirrinosa 6 eli alimmassa putkisto-osuudessa.

Savukaasun lämpötila edellisen lämmönsiirtimen jälkeen on 588,58 °C, ja veden lämpötila on 20,60 °C. Seinämän lämpötilaksi on oletettu edellisten lämmönsiirtimien perusteella 30 °C. Savukaasun loppulämpötilaksi arvioitiin 100 °C, jolloin savukaasun keskimääräinen lämpötila kyseisessä lämmönsiirrinosa on 350 °C. Jokaisessa lämmönsiirrinosa arvioitua loppulämpötilaa tarkennettiin laskentojen jälkeen. Keskimääräisen lämpötilan perusteella interpoloitiin savukaasun lämpötilariippuvaiset arvot taulukoista 6–10.

Lämmönsiirrinosan 6 korkeus on 0,24 m, pyöreiden putkien halkaisija 0,05 m ja keskiputken leveys siirrinosan keskimääräisessä korkeudessa 0,11 m. Savukaasujen tilavuusvirtaus interpoloitiin taulukosta 6 siirrinosan keskimääräisen lämpötilan perusteella. Veden tilavuusvirtaus laskettiin jakamalla massavirta veden tiheydellä sen lähtölämpötilassa.

$$\dot{V}_{sk} = 0,02599 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{V}_{vesi} = 0,00041 \frac{m^3}{s}$$

Reynoldsin luku yhden pyöreän putken savukaasuvirtaukselle laskettiin kaavalla 13.

$$Re_{pyöreä\ putki} = 6106,006$$

Laskettiin Reynoldsin luku keskiputken savukaasuvirtaukselle kaavalla 13, jossa putken halkaisija on neliöputken hydraulinen halkaisija (kaava 14).

$$Re_{keskiputki} = 13\,433,213$$

Reynoldsin luvut ovat reilusti suurempia kuin 2300, joten virtaus on kaikissa putkissa turbulenttista. Laskettiin Nusseltin luku erikseen sekä yhdelle pyöreälle putkelle että keskiputkelle kaavalla 15.

$$Nu_{pyöreä\ putki} \approx 17,9092$$

$$Nu_{keskiputki} \approx 39,7039$$

Laskettiin konvektiivinen lämmönsiirtokerroin savukaasupuolelle kaavalla 16.

$$\alpha_{k_{pyöreätputket}} = 130,584$$

$$\alpha_{k_{keskiputki}} = 16,449$$

$$\alpha_{k_{sk,ls}} = 147,033$$

Veden lämpötilariippuvaiset arvot interpoloitiin taulukosta 11 veden lähtölämpötilan perusteella. Laskettiin Reynoldsin luku veden virtaukselle kaavalla 13, ja tämän arvon perusteella voidaan todeta virtauksen olevan turbulenttista.

$$Re_{vesi} = 2355,189$$

Laskettiin Nusseltin luku kaavalla 15.

$$Nu_{vesi} \approx 59,487$$

Laskettiin konvektiivinen lämmönsiirtokerroin vesipuolelle kaavalla 16.

$$\alpha_{k_{vesi}} = 159,237$$

Lämmönsiirrinosan lämmönläpäisykerroin laskettiin kaavalla 17.

$$k_a = 76,392$$

Laskettiin lämpökapasiteettivirta erikseen savukaasu- ja lämmönsiirtopuolelle kaavalla 18. Näistä savukaasun arvo on pienempi, joten se on seuraavissa laskuissa C_{min} ja veden arvo on C_{max} .

$$C_{sk} = 16,201 \frac{J}{Ks}$$

$$C_{vesi} = 1713,722 \frac{J}{Ks}$$

Dimensioton konduktanssi laskettiin kaavalla 19.

$$z = 1,920$$

Lämmönsiirtimen rekuperaatioaste, joka kuvaa lämmönsiirtimen tehokkuutta, laskettiin kaavalla 20.

$$E = 0,857$$

Savukaasun loppulämpötila lämmönsiirrinosan jälkeen laskettiin kaavalla 21.

$$T_{sk_loppu} = 101,601 \text{ } ^\circ C$$

Veden loppulämpötila lämmönsiirrinosan jälkeen laskettiin kaavalla 22.

$$T_{vesi_loppu} = 25,205 \text{ } ^\circ C$$

5.5 Hyötysuhde

Jokaisen lämmönsiirrinosan laskuissa laskettiin loppulämpötila vedelle. Veden loppulämpötila on seuraavassa lämmönsiirrinosassa veden lähtölämpötila. Yksi

osa kerrallaan saatiin laskettua veden loppulämpötila viimeisen lämmönsiirrin-
osan jälkeen. Veden massavirta pysyy koko ajan samana, joten lämmönsiirto-
teho veteen lasketaan kaavalla 23:

$$Q_{ts} = 9,80096 \text{ kW}$$

Hyötysuhde lasketaan kaavalla 24:

$$\eta = \frac{9,80096 \text{ kW}}{20,2062 \text{ kW}} = 0,485 \Rightarrow 48,5 \%$$

6 HYÖTYSUHTEN PARANTAMINEN

Kaminan laskettu hyötysuhde on yläpalokaminalle varsin hyvä. Työn alussa jouduttiin tekemään paljon oletuksia lähtöarvoista, joten lopuksi laskettiin hyötysuhde uudelleen muuttamalla lähtöarvoja. Veden virtausarvoa muuttamalla niin, että vesi vaihtuu kaminassa välillä kerran 1...4 minuutissa, saatiin veden loppulämpötila muuttumaan 21,96 °C:sta 27,91 °C:seen. Tällöin kaminan hyötysuhde vaihteli välillä 48,1 %–49,3 %.

Merkittävin lämmönsiirto savukaasuista veteen tapahtuu kaminan putkisto-osuudessa, mutta tulipesässä saavutettavalla lämpötilalla on myös merkitystä kaminan hyötysuhteeseen. Jos tulipesän pohjalla saavutettaisiin adiabaattinen palamislämpötila, hyötysuhde nousisi 53,5 %:iin ja veden loppulämpötilaksi saataisiin 26,34 °C.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin uima-altaiden lämmitykseen suunniteltua yläpalokaminana. Tavoitteena oli laskea toimeksiantajan piirtämän yläpalokaminan lämpötekniisiä ominaisuuksia, selvittää kaminan hyötysuhde sekä pohtia siihen vaikuttavia tekijöitä. Työssä saavutettiin asetetut tavoitteet.

Työssä laskettiin puun poltossa syntyvän savukaasun koostumus ja ominaisuudet eri lämpötiloissa. Kamina jaettiin useampaan eri lämmönsiirrinosaan, joita tarkasteltiin erillisinä lämmönsiirtiminä. Selvitettiin veden ja savukaasun lämpötilat jokaisen lämmönsiirtimen jälkeen, mistä lopputuloksena saatiin veden loppulämpötila. Tämän perusteella saatiin laskettua kaminan hyötysuhde.

Laskuja varten jouduttiin tekemään paljon arviointia ja oletuksia, joita lopuksi tarkennettiin saatujen tulosten perusteella. Näin iteroitiin tarkemmat tulokset. Jokaisen lämmönsiirtimen osalta laskettiin savukaasun säteilyn ja konvektion, seinämän läpi johtumisen ja veden konvektion lämmönsiirtokertoimet. Lisäksi huomioitiin yläpalokaminan monimutkainen geometria.

Kaikki laskut tehtiin Excel-laskentataulukolla. Työn lopputuloksena saatiin laskentataulukko, johon käyttäjä voi syöttää eri lähtöarvoja, ja taulukko antaa automaattisesti uudet laskelmat.

LÄHTEET

1. Esittely. 2017. Kerttu Saalasti Instituutti. Saatavissa:
<http://www.oulu.fi/ksi/node/15658>. Hakupäivä: 24.04.2017.
2. Faktaa 2017. Bioenergian Pikkujättiläinen. Saatavissa:
<http://www.bioenergieneuvoja.fi/faktaa/>. Hakupäivä: 18.04.2017.
3. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka 5., uusittu painos. Helsinki. Oy Edita Ab.
4. Alakangas, Eija – Erkkilä, Ari – Oravainen, Heikki 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys. Polttopuun tuotanto ja käyttö. VTT julkaisut. Jyväskylä: VTT. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.pdf>. Hakupäivä: 10.05.2017.
5. Laaksovirta, Pekka 2013. Energiatehokas puulämmitys. Opinnäytetyö. Lahti. Lahden ammattikorkeakoulu, tekniikan laitos.
6. Tuomaala, Pekka 2002. Tulisijan sekä lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien yhteiskäyttö. Yhteisrahoitteen tutkimushankkeen (COMBI) tutkimustulosten yhteenveto, 23.12.2002. VTT julkaisut. Jyväskylä: VTT. Saatavissa:
<http://www.harmaair.com/data/www/files/Air%20IN%20hy%C3%B6tysuhde.pdf>. Hakupäivä: 11.05.2017.
7. Moran, Michael J. – Shapiro, Howard N. – Boettner, Daisy D. – Bailey, Margaret B 2012. Principles of Engineering Thermodynamics 7th Edition. Hoboken. John Wiley & Sons Inc.
8. Mäkelä, Veli-Matti 2014. T630303 Lämmönsiirtotekniikka 3 op. Opintojakson opintomateriaali 2014. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
9. Yläpalokaminan suunnittelukuva 2016. Kerttu Saalasti -instituutti, Tulevaisuuden tuotantoteknologiat -tutkimusryhmä.
10. Kakko, Markku 2012. Lämminvesikattilan lämpötekniinen suunnittelu. Opinnäytetyö. Kotka. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma.

11. Ryti, Henrik – Ylinen, Arvo – Hietala, Veijo – Liede, Jaakko – Jotuni, Pertti 1975. Tekniikan käsikirja 2 8., uusittu ja lisätty painos. Jyväskylä. K. J. Gummerus Oy.
12. Tölli, Mikael 2015. Alapalokaminan lämpötekniinen laskenta. Opinnäyte-työ. Oulu. Oulun ammattikorkeakoulu, Kone- ja tuotantotekniikan koulu-tusohjelma.
13. Ylikunnari, Jukka 2012. T630203 Virtaustekniikka 3 op. Opintojakson opintomateriaali 2012. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksik-kö.
14. Wagner, Walter 1994. Lämmönsiirto. Helsinki: Painatuskeskus Oy.
15. Seppänen, Raimo – Kervinen, Martti – Parkkila, Irma – Karkela, Lea – Meriläinen, Pekka 2006. MAOL-taulukot 2. painos. Keuruu: Otavan Kirja-paino Oy.

