

Mikael Tölli

## **ALAPALOKAMIINAN LÄMPÖTEKNINEN LASKENTA**

# **ALAPALOKAMIINAN LÄMPÖTEKNINEN LASKENTA**

Mikael Tölli  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka, energiatekniikka

---

Tekijä: Mikael Tölli

Opinnäytetyön nimi: Alapalokamiinan lämpötekniinen laskenta

Työn ohjaajat: Kari Mäntyjärvi, Oulun yliopiston Oulun Eteläisen instituutti (FMT), Jukka Ylikunnari, OAMK

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015

Sivumäärä: 64 + 0 liitettä

---

Insinöörityö tehtiin Oulun yliopiston alueyksikön Oulun Eteläisen instituutin Tu-levaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmälle. Tavoitteena oli selvittää tilaajan piirustuksen mukaisen alapalokamiinan hyötysuhde ja hyötysuhteen kannalta merkittävimmät rakenteet sekä esittää helposti toteutettavissa olevia hyötysuhdetta parantavia rakennevaihtoehtoja. Samalla tuli tutustua avoimen lähdekoodin CAD-ohjelmistojen käyttöön.

Työ tehtiin taulukkolaskentaohjelmalla, jonka avulla laskettiin tilaajan suunnitelukuviin perustuen kamiinan eri kohdissa vallitsevia lämmönsiirtotehoja. Kamiina jaettiin lämmönsiirtimiin, joita voitiin tarkastella yksittäisinä ja kokonaisuuteen kuuluvina. Kokonaislämmönsiirrintehoa käytettiin apuna kokonaisyötysuhteen määrittämisessä. Samalla tutkittiin polttoaineen kosteuden, ilmakertoimen ja palonopeuden vaikutusta kokonaisprosessiin. Laskelmien pohjalta piirrettiin savukaasutehon kuvaajat, joista voi erottaa suhteellisesti tehokkaimmat lämmönsiirtimet. Tulipesä oli kaikissa malleissa tehokkain lämmönsiirrin.

Lopuksi laskettiin uusien hyötysuhdetta parantavien rakenteiden lämmönsiirto- tehoja ja kamiinan hyötysuhde tehtyjen muutosten jälkeen. Hyötysuhdetta pa- rannettiin tekemällä muutoksia tilaajan kamiinan paloperän päälle. Sinne mal- linnettiin savukaasuvirtauksessa poikittain olevaa putkipakettia ja levypakettia, joiden läpi otettaisiin tulovesi. Kolmantena kokeiluna oli paloperän päälle asen- nettava pystyputkipaketti, jonka läpi savukaasut virtaisivat. Uusien rakenteiden vetoisuus arvioitiin, koska kamiinan on tarkoitus toimia luonnonvetoisena.

Työssä selvisi tilaajan piirustusten mukaisen alapalokamiinan hyötysuhde ja keksittiin uusia hyötysuhdetta parantavia rakenteita. Hyötysuhteeseen vaikutta- vat palamisen hyötysuhde, polttoainetehto ja polttoaineen kosteus sekä ilmaker- roin. Vaakaputkinen kamiina oli hyötysuhteeltaan paras, ja vetoisuudeltaan pa- ras oli pystyputkillla varustettu kamiina. Työn tuloksena on saatu tietoa useista kamiinamalleista, joita voi valmistaa ja kehittää edelleen paremmaksi.

---

Asiasanat: alapalokamiina, hyötysuhde, lämmönsiirto

## **ALKULAUSE**

Tässä insinööriyössä pääsin hyödyntämään ja soveltamaan aiemmin kursseilla opittuja asioita oikeaan työkohteeseen. Näiden lisäksi opin paljon uusia asioita. Työn ohjaajana ja toimeksiantajana oli tutkimusjohtaja Kari Mäntyjärvi. Oulun ammattikorkeakoululta ohjaavana opettajana toimi lehtori Jukka Ylikunnari sekä kielenohjaajana lehtori Tuija Juntunen.

Kiitän tutkimusjohtaja Kari Mäntyjärveä mahdollisuudesta päästä tekemään insinööriyötä sekä Oulun ammattikorkeakoulun puolelta ohjanneita lehtoreita Jukka Ylikunnaria ja Tuija Juntusta.

Oulussa 6.3.2015

Mikael Tölli

# SISÄLLYS

|  |    |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ  | 3  |
| ALKULAUSE  | 4  |
| SISÄLLYS   | 5  |
| 1 JOHDANTO   | 7  |
| 2 PUUN PALAMINEN                                       | 8  |
| 2.1 Puun lämpöarvo                                     | 8  |
| 2.1.1 Adiabaattinen palamislämpötila                   | 8  |
| 2.1.2 Polttopuun kuivuminen                            | 9  |
| 2.1.3 Tulipesästä poistuvien savukaasujen lämpötila    | 10 |
| 2.2 Palamisen vaiheet                                  | 10 |
| 2.2.1 Kosteuden haihtuminen                            | 11 |
| 2.2.2 Pyrolyysi  | 11 |
| 2.2.3 Syttyminen                                       | 11 |
| 2.2.4 Jäännöshiilen palaminen                          | 12 |
| 2.3 Panospolttoprosessi                                | 12 |
| 2.4 Lämpötilatasot                                     | 12 |
| 3 ALAPALOKAMIINAN RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATE          | 13 |
| 4 LÄMMÖN SIIRTYMINEN                                   | 14 |
| 4.1 Säteilylämmönsiirto                                | 14 |
| 4.2 Johtuminen   | 15 |
| 4.3 Konvektio  | 15 |
| 5 LÄMPÖTEKNINEN LASKENTA JA HYÖTYSUHTEEN SELVITTÄMINEN | 16 |
| 5.1 Hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät                | 16 |
| 5.2 Energiatase  | 17 |
| 5.3 Massatase  | 18 |
| 5.4 Lämmönsiirtotehon laskemisen periaate              | 18 |
| 5.5 Laskentakaavat                                     | 19 |
| 5.6 Savukaasulasku                                     | 30 |
| 5.7 Savukaasutehon ja lämmönsiirtotehon laskenta       | 38 |

|   |    |
|---|----|
| 5.7.1 Savukaasupuoli                        | 39 |
| 5.7.2 Vesipuoli                             | 43 |
| 5.7.3 Kokonaislämmönsiirtoteho              | 45 |
| 5.8 Lämmönsiirtimien suhteellinen tehokkuus | 46 |
| 5.9 Ilmakertoimen vaikutus                  | 48 |
| 5.10 Puun kosteuden vaikutus                | 49 |
| 6 HYÖTYSUHTEEN PARANTAMINEN                 | 51 |
| 6.1 Poikittainen putkipatterimalli          | 51 |
| 6.1.1 Hyötysuhde ja suhteellinen tehokkuus  | 52 |
| 6.1.2 Vetoisuuden arviointi                 | 53 |
| 6.2 Pystymallinen putkipatteri              | 56 |
| 6.2.1 Hyötysuhde ja suhteellinen tehokkuus  | 57 |
| 6.2.2 Vetoisuuden arviointi                 | 58 |
| 6.3 Levylämmönsiirrin                       | 58 |
| 6.3.1 Hyötysuhde ja suhteellinen tehokkuus  | 59 |
| 6.3.2 Vetoisuuden arviointi                 | 60 |
| 7 YHTEENVETO                                | 61 |
| LÄHTEET                                     | 63 |

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tilaajana on Oulun yliopiston alueyksikön Oulun Eteläisen instituutin Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä. Alueyksiköllä on yliopistollista tutkimus- ja kehitystoimintaa Pohjois-Pohjanmaan eteläosien alueilla. Yksikkö vahvistaa yliopistollisella osaamisella monipuolisesti näiden alueiden vireyttä ja elinvoimaisuutta. (1.)

Työssä selvitetään alapalotyyppisen, kylpytynnyreiden ja uima-altaiden lämmitykseen suunnitellun kamiinan termodynaamisia ja lämpötekniisiä ominaisuuksia tilaajalta saatujen piirustusten pohjalta. Tavoitteena on saada selville kamiinan hyötysuhde ja löytää hyötysuhteen kannalta merkittävimmät paikat rakenteessa. Samalla mietitään erilaisia helposti toteutettavissa olevia rakennevaihtoehtoja, joilla hyötysuhdetta voitaisiin saada paremmaksi.

Tarkastelun kohteena olevan alapalokamiinan hyötysuhde on ratkaistu jakamalla kamiina laskennallisesti tarkasteltavissa oleviin lämmönsiirrin kokonaisuuksiin. Näiden kokonaisuuksien lämmönsiirtotehoja ja savukaasutehoja tarkastellaan peräkkäisessä järjestyksessä tulipesän ja savupiipun välillä. Laskennassa on käytössä runsaasti lämpötilasta riippuvaisia vakioita ja toisiinsa vaikuttavia laskentakavaoja. Laskenta on tehty taulukkolaskentalaskentaohjelmalla, joka soveltuu hyvin tällaisen laajojen kokonaisuuksien ja lämpötilasta riippuvaisien muuttujien hallintaan.

Hyötysuhteen selvittämisen jälkeen mietitään, voisiko tilaajan alapalokamiinaan tehdä helposti toteutettavissa olevia muutoksia, joilla voitaisiin parantaa kokonaishyötysuhdetta. Testattavat rakenteet ideoidaan ja lasketaan lämmönsiirtoteho laskentaohjelmalla, jonka jälkeen voidaan laskea kokonaishyötysuhde. Samalla luonnonvedolla toimivien tulisijojen kohdalla on tärkeää selvittää, min-käläisen virtausvastuksen rakenne aiheuttaa.

## 2 PUUN PALAMINEN

Palamisreaktiossa polttoaineen alkuaineet reagoivat hapen kanssa. Eksotermisen palamisprosessi tuottaa lämpöä ja endotermisen on puolestaan lämpöenergiaa kuluttava reaktio. Polttopuunkin sisältämän typen (N) reaktio hapen kanssa on lämpöä kuluttava endotermisen reaktio. (2, s. 79.)

### 2.1 Puun lämpöarvo

Puun palaessa sen kemialliset ainesosat reagoivat hapen kanssa. Valtaosa sen sisältämistä ainekomponenteista on eksotermisiä, joissa vapautuu komponentille ominainen energia lämpönä. (2, s. 79.)

Taulukossa 1 on nähtävillä puun kuiva-ainekoostumus, tuhkan osuus ja tyypillinen kosteus. Luvussa 4 on laskettu savukaasulasku, jossa on hyödynnetty taulukon tietoja. Polttopuiden kosteusprosentti on määriteltä taulukossa olevaa tyypillistä kosteutta pienemmäksi, koska alapalokamiinan polttoaineena käytetään kuivatettuja halkoja.

*TAULUKKO 1. Puun kuiva-ainekoostumus prosentteina ja tyypillinen kosteus (2, s. 38)*

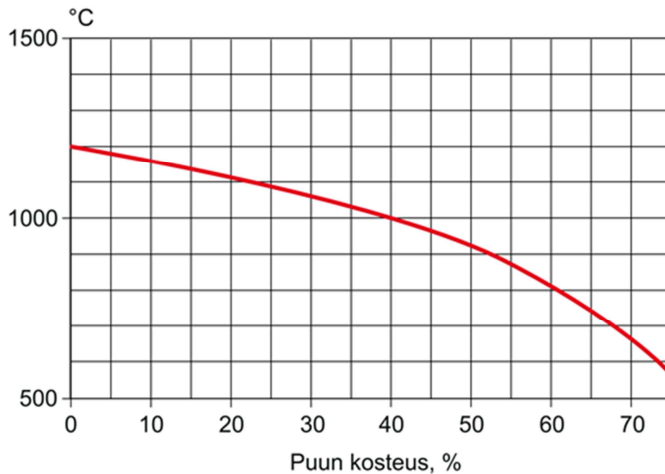
| Polttoaine | C    | H   | S | O    | N   | Tuhka | Kosteus |
|------------|------|-----|---|------|-----|-------|---------|
| Puu        | 50,4 | 6,2 | - | 42,5 | 0,5 | 0,4   | 55      |

#### 2.1.1 Adiabaattinen palamislämpötila

Adiabaattisella palamislämpötilalla tarkoitetaan polttoaineen palaessa liekin välittömässä läheisyydessä vallitsevaa teoreettisesti saavutettavissa olevaa korkeinta lämpötilaa. Tästä teoreettisesta palamisprosessista ei siirry lämpöenergiaa ympäristöön. Palamisessa muodostuva lämpöenergia menee pelkästään savukaasujen lämmittämiseen. (2, s. 95; 3, s. 39.)



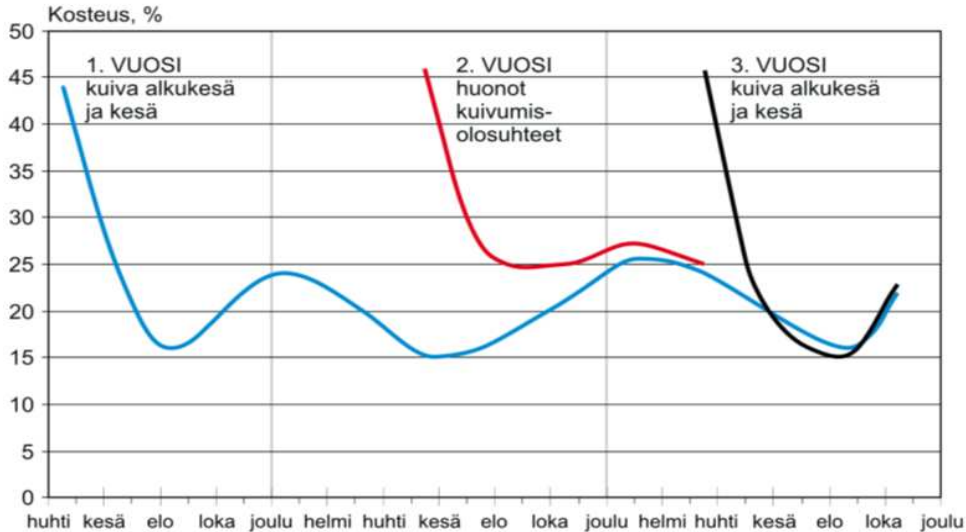
Adiabaattisesta palamislämpötilasta voidaan piirtää kuvaaja puun kosteuspitoisuuden mukaan, kun ilmakerroin pysyy samana. Ilmakerrointa suurennettaessa lämpötila pienenee ja pienennettäessä suurenee teoreettiseen ilmakertoimeen ( $\lambda=1$ ) asti. Kuvassa 1 on nähtävillä kosteuden vaikutus adiabaattiseen palamislämpötilaan ilmakertoimella 2.



*KUVA 1. Puun kosteuspitoisuuden vaikutus teoreettiseen liekin lämpötilaan ilmakertoimella ( $\lambda$ ) 2 (4, s. 42)*

### **2.1.2 Polttopuun kuivuminen**

Kuvassa 2 on kolme erilaista kuvajaa, jossa näkyy kuvaajia puun kosteudesta vuodenajasta ja kosteudesta riippuen. Puun kosteus vaihtelee hieman ympäristön lämpötilan ja kosteuden mukaan. Katetussa puuliiterissä kosteus vaihtelee vuodenajasta riippuen 15–20 % välillä. (4, s. 31.)



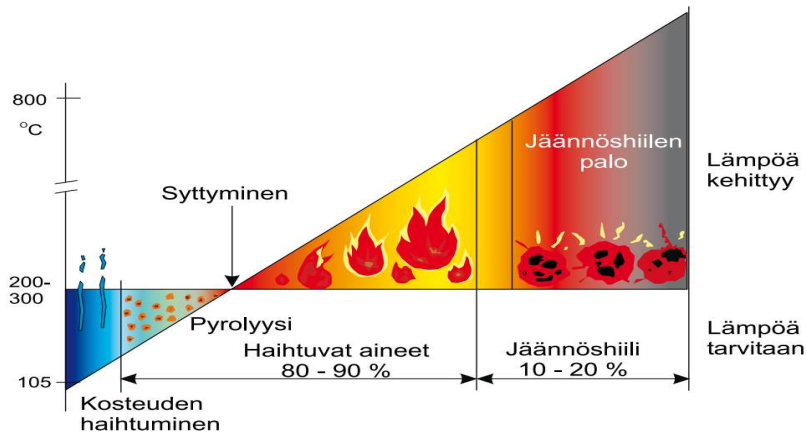
KUVA 2. Polttopuun kosteuden vaihtelu eri vuodenaikoina (4, s. 30)

### 2.1.3 Tulipesästä poistuvien savukaasujen lämpötila

Tulipesästä menee seinämän läpi veteen kattilan sisäinen lämpövirta ( $\Phi_{\text{sis}}$ ), josta pieni osa jatkaa lämpöeristyksestä huolimatta kattilan ulkopinnasta tulipesästä pois lämpöhäviövirtana ( $\Phi_h$ ). Kattilassa voi olla myös muita lämpöhäviövirtoja, esimerkiksi tulipesäluukun kautta kulkeutuva lämpöhäviövirta. Nämä häviötehot huomioimalla voidaan laskea tulipesästä lähtevien savukaasujen lämpötila, kun tiedetään adiabaattinen palamislämpötila ja polttoaineen esilämmitämiseen ja tuhkan mukana menevät entalpiavirrat arvioidaan merkityksettömän pieniksi. (5.)

### 2.2 Palamisen vaiheet

Puun palamisessa on havaittavissa erilaisia vaiheita. Aluksi tarvitaan muualta tuotua lämpöenergiaa, mutta syttymisvaiheen jälkeen reaktio tuottaa lämpöenergiaa enemmän kuin kuluttaa. Kuvassa 3 on nähtävissä palamisen etenemisen vaiheet vasemmalta oikealle. Pystyakselilla nähdään lämpötilatasot ja vaakakselilla nähdään palamisprosessin eteneminen.



KUVA 3. Puun palamisen vaiheita (4, s. 42)

### 2.2.1 Kosteuden haihtuminen

Puu tarvitsee syttyäkseen aktivoitumisenergiaa, koska silloin prosessissa kuluu enemmän energiaa tuottoon verrattuna. Aluksi lämpöä tarvitaan kosteuden haihduttamiseen, joka alkaa lämpötilan noustessa 100–105 °C:n lämpötilaan. Kosteus voi siirtyä polttoaineen sisällä lämpenemisnopeudesta riippuen nesteen tai kaasun olomuodoissa. Puun sisällä paine voi olla suurempi verrattuna vallitsevaan ilmanpaineeseen. (4, s. 42.)

### 2.2.2 Pyrolyysi

Pyrolyysi on lämpöenergian puussa aiheuttamia hajoamisreaktioita, jossa sen sisältämät yhdisteet muuttuvat toisenlaisiksi yhdisteiksi. Syntyneet pyrolyysituotteet palavat puun pinnalla ja voimistavat reaktioita. Puun hemiselluloosa pilkkoutuu 200–350 °C:n lämpötilassa, selluloosa 250–450 °C:ssa ja ligniini 200–500 °C:ssa. (4, s. 43.)

### 2.2.3 Syttyminen

Syttyminen tapahtuu siinä vaiheessa, kun reaktioiden lämmöntuotto on suurempaa kulutukseen verrattuna. Kaasujen pitoisuuksien ja lämpötilan noustessa seos syttyy palamaan, mikä havaitaan näkyvänä liekkiä puun pinnalla. Yli 180 °C:n lämpötilassa kaasut voivat palaa hetkellisesti, mutta yli 225 °C:n lämpötilassa

lassa palaminen jatkuu pidemmän aikaa itsenäisesti. Yleensä syttyminen tapahtuu vasta 270 °C:ssa, jolloin lämmöntuotto ylittää lämpöhäviöt. (4, s. 43.)

#### **2.2.4 Jäännöshiilen palaminen**

Jäännöshiilen palaminen on liekitön palamisen vaihe, jossa reaktio tapahtuu hiilen pintakerroksen lähellä. Jäännöshiilellä on korkea lämpöarvo. Sen palamisella on tärkeä rooli kokonaislämmöntuottoa ajatellen. Palamisesta saatavan lämpötehon suuruus on 25–50 % kokonaislämmitystehosta. (6, s. 35.)

#### **2.3 Panospolttoprosessi**

Työssä tarkasteltavan alapalokamiinan palamisprosessi on panostyyppinen. Tulipesään pinotaan puita, jotka palavat tietyllä reaktionopeudella. Palamisilmantarve vaihtelee polton aikana ja on riippuvainen palamisreaktion vaiheesta. Lisäksi ilmantarpeeseen vaikuttavat polttoprosessissa olevien puiden koko, kosteus ja ladottujen polttopuiden määrä. (7.)

#### **2.4 Lämpötilatasot**

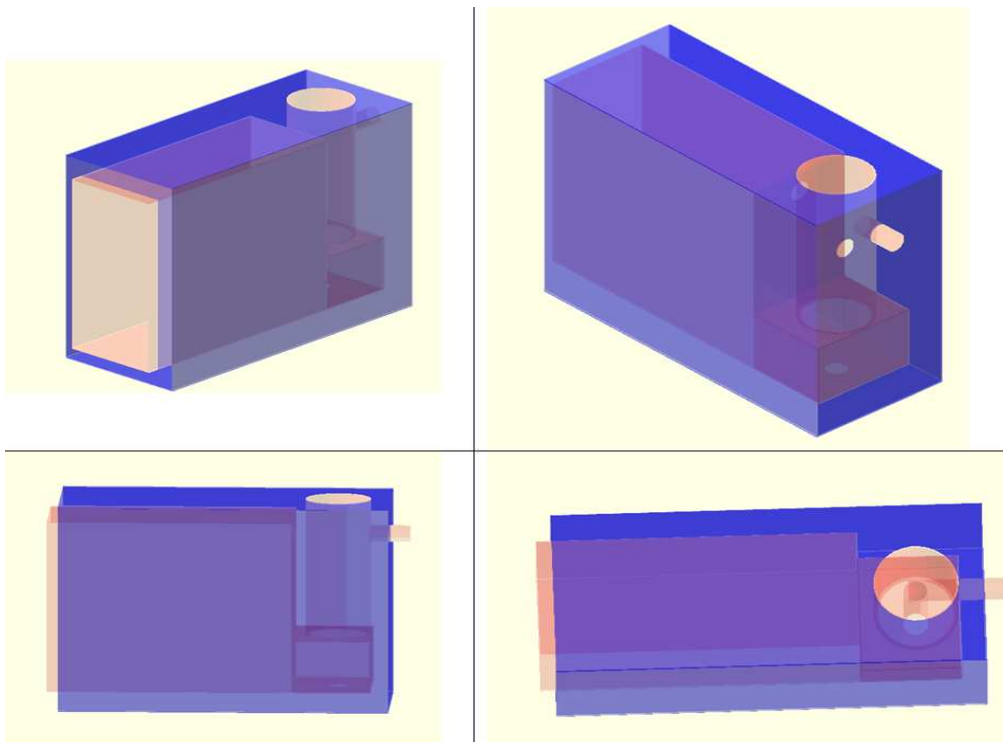
Puun poltossa on tärkeää päästä tarpeeksi korkeisiin lämpötilatasoihin, jotta pystyttäisiin hyödyntämään hyvällä hyötysuhteella polttoaineesta saatavissa oleva lämpöenergia. Erityisen kriittisiä ovat polttolaitteet, joiden tulipesissä ei ole muurauksia ja seinämien lämpötilat pysyvät 60–100 °C:ssa. Näissä muuramattomissa tulipesämalleissa on olemassa vaara, että palamattomia kaasuja ja polttoainehiukkasia pääsee palamattomina polttoprosessin lävitse. (3, s. 37–38.)

Jos hapen ja palavien kaasujen seos pysyy syttymisrajojen sisäpuolella, voidaan saada aikaan hyväkin polttoprosessi. Arinaa vasten palavan hiiliaineksen on pysyttävä reilussa 500 °C jatkuvan palamisen turvaamiseksi. Arinalla olevan palamispesäkkeen on oltava niin suuri, että siitä syntyvä ja säteilevä lämpöenergia pitää polttoaineen ja tulipesän lämpötilan tarpeeksi korkeana. (3, s. 37–38.)

### 3 ALAPALOKAMIINAN RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATE

Alapalotyyppisissä kattiloissa ja kamiinoissa polttoaine pinotaan varastopesään. Varastopesän alempi osa muodostaa varsinaisen tulipesän, jossa arinaa lähinnä olevat puut palavat. Varastopesässä puut esilämpenevät, kaasuuntuvat ja valuvat alaspäin arinaa kohden. Puiden palaessa arinalle painuu tulipesän varastopesästä uutta polttoainetta tilalle.

Kuvassa 4 näkyy opinnäytetyössä tutkittavan kamiinan suunnittelukuva, joka on saatu työn toimeksiantajalta. Alapalokamiinan lämmönsiirtorakenteet ovat suurilta osin vesivaipan ympäröimiä. Poikkeuksena on tulovesiputki, joka sijaitsee kamiinan takaseinän yläosassa. Se on taivutettu savupiipun kautta kamiinan paloperän lävitse alavesivaippaan. Vaipassa olevaa lämmitysvettä on suunniteltu kierrätettävän sähkötoimisen vesipumpun avulla. Menovesiputki on kamiinan yläosassa, jonne kaikista lämminnein vesi nousee ja virtaa lämmityskohteeseen. Ulkokuoren pintaan on tarkoitus asentaa lämpöeristekerros.



*KUVA 4. Tilaajan alapalokamiinan suunnittelukuva (8)*

## 4 LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Lämmön perusolemukseen kuuluu pyrkimys lämpötilaerojen tasaantumiseen. Lämpövirransuunta on aina kuumemmasta alemman lämpötilan suuntaan. Lämpöenergia siirtyy väliaineesta toiseen kolmella eri tavalla: säteilemällä, johtumalla tai konvektion avulla. (9.)

### 4.1 Säteilylämmönsiirto

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka voimakkuus riippuu aineen lämpötilasta. Säteilyn aallonpituus pienenee lämpötilan kasvaessa ja pitenee jäähtyessään. Lämpöä säteilevästä aineesta lähtenyt säteily muuttuu uudestaan lämmöksi kohdatessaan jonkin aineen. Säteilylämmönsiirto ei vaadi väliainetta ja sen merkitys kasvaa korkeisiin lämpötiloihin mentäessä. (9; 2, s. 206.)

Lämpösäteilyä lähettävät kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen  $-273\text{ °C}$ :n yläpuolella. Kappaleen lämpötilan ollessa saman kuin ympäristön säteilee kappaleeseen ympäristöstä ja ympäristöön kappaleesta yhtä paljon lämpöä. Jos ympäristön lämpötila on kylmempi tarkasteltavaan kappaleeseen verrattuna, säteilee kappale enemmän ympäristöön kuin vastaanottaa ja lämpötilaero tasaantuu. (2, s. 206.)

Tulipesässä oleva liekki on voimakkaasti säteilevää, koska liekissä on kiinteitä aineita, tuhkaa ja nokea. Näiden lisäksi tulipesässä ja savukaasuissa on tapauskohtaisina prosenttiosuuksina säteileviä kaasumaisia aineita: hiilidioksidia, häkää, vesihöyryä ja raskaita hiilivetyjä. Teknisesti tärkeimpiä säteilijöitä ovat hiilidioksidi ja vesihöyry. Nämä kannattaa huomioida varsinkin, jos näiden osuus savukaasuissa suuri. Alkuainekaasuista vety, happi ja typpi eivät ole lämpösäteileviä. Lämpösäteily on tulipesän vallitseva lämmönsiirtymismuoto. (3, s. 21–22; 10, s. 130–131.)

Säteilevän kappaleen karheudella ja värillä on merkitystä säteilyn voimakkuuteen. Tumma ja karkea pinta lähettää säteilyä voimakkaammin ja vaalea tai kiil-

tävä pinta vähiten. Lämpökattiloiden eristeiden suojaksi on useimmiten valittu kirkasta peltiä, joka on hyvä materiaalivalinta säteilylämmönhukkakin ajatellen. (3, s. 22.)

## **4.2 Johtuminen**

Lämmön johtumisessa kiinteässä väliaineessa sen läpi kulkee lämpövirta. Kiinteissä aineissa esiintyy lämpöväärähtelyä, jossa atomit värähtelevät. Värähtely etenee ja leviää värähtelevien atomien saadessa värähtelemään yhä uusia viereisiä atomeja. Teräslevyn seinämän lävitse siirtyvän lämmönsiirron taustalla on tämäntyyppinen värähtelyketju. (11.)

Lämmönsiirtopintojen valmistuksessa käytetään yleensä hyvin lämpöä johtavia teräslevyjä ja valurautoja. Kattilan veden puoleinen pinta voi likaantua, jos lämmitettävän veden epäpuhtaudet alkavat kerrostumaan lämmityspinnalle ja muodostavat kattilakiveä. Savukaasupuoli likaantuu aina kiinteitä polttoaineita käytettäessä, jolloin lämmönsiirtopinnoille muodostuu käytetystä polttoaineesta riippuen tuhkaa, nokea, pikeä ja kuonaa. Lämmönsiirtopintoja kannattaa nuohota sopivin väliajoin, jolloin lämmönsiirtohyötysuhde saadaan pysymään hyvänä ja samalla vetoisuutta heikentävät virtausvastukset pysyvät pienempinä. (3, s. 22–23.)

## **4.3 Konvektio**

Lämmön siirtyessä liikkuvan nesteestä tai kaasusta ja sitä koskettavan kiinteän pinnan välillä, puhutaan konvektiosta. Se jaetaan kahteen lajiin, pakotettuun ja vapaaseen. Pakotetussa konvektiossa lämmönsiirtoa parantavan virtauksen aiheuttaa pumppu tai puhallin. Vapaassa konvektiossa virtaukset syntyvät lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen vaikutuksesta. Esimerkiksi kiinteän seinämän vieressä lämmennyt vesi nousee fysiikan lakien mukaisesti harvempana aineena ylöspäin. (2, s. 205.)

## **5 LÄMPÖTEKNINEN LASKENTA JA HYÖTYSUHTEN SELVITTÄMINEN**

Tässä työssä tarkasteltavan alapalokamiinan hyötysuhteen ratkaiseminen on aloitettu laskemalla savukaasulasku. Savukaasulaskun alkajaisiksi arvioidaan käytettävän polttopuun kosteusosuus kuiva-aineessa. Hyvissä kuivausolosuhteissa voidaan päästä 15–25 % kosteusosuuteen. Samalla on tarpeellista arvioida laskuissa käytettävä ilmakerroin. VTT:n mukaan suuluukullisten takkojen ilmakerroin on yleensä 2–2,5 välillä, eli ilmaa käytetään 7,5–10 m<sup>3</sup> poltettua puukiloa kohden. Suuluukuttomissa takkamalleissa ilmakerroin voi olla jopa 10–30 välillä. Ilmakertoimen ja puun kosteusosuuden arvioinnissa on hyödynnetty näitä tietoja. (4, s. 37.)

### **5.1 Hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät**

Hyötysuhde riippuu palamisen hyötysuhteesta ja kattilan lämmönsiirtimien tehokkuudesta. Lämmönsiirron hyötysuhde on matala, kun palavan polttoaineen lämpöä ei saada hyödynnettyä kohteessa. Palamisen ja lämmönsiirron tehokkuuteen vaikuttaa palamisilman syöttö, joka riippuu käytettävästä polttolaitteesta ja polttoaineesta. Palamisilman ja palokaasujen täytyy muodostaa sopiva seos, jotta palaminen onnistuu hyvin. (7, s. 16.)

Poltossa voi tulla tilanteesta riippuen erilaisia häviöitä, jotka heikentävät hyötysuhdetta. Häviöitä syntyy palamattomasta polttoaineesta, palamattomasta palokaasuista, savukaasun termisistä häviöistä, johtumishäviöistä ja säteilyhäviöistä. Taulukkoon 2 on koottu palamisen hyvyyteen vaikuttavia asioita, joissa tekijöinä ovat viipymäaika, lämpötila palamisilman määrä ja sekoittuminen. (7, s. 15–16.)



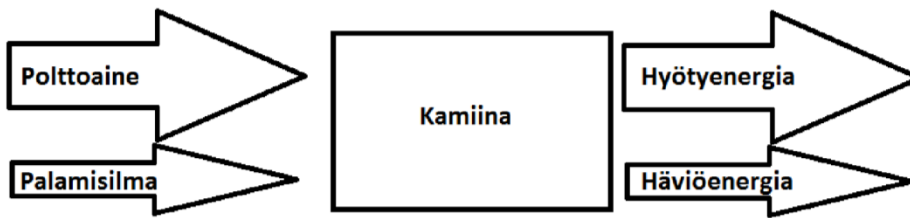
TAULUKKO 2. Palamisen hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä (7, s. 16)

| TEKIJÄT            | OMINAISUUDET  | ILMIÖT  |
|--------------------|---|---|
| Viipymäaika        | Tulipesän koko, muotoilu ja veto                      | Jos viipymäaika on liian pieni, pyrolyysikaasut eivät ehdi reagoida hapen kanssa ennen savupiippua ja palaminen on epätäydellistä         |
| Lämpötila          | Polttolaitteen lämmönvaraavuus ja ilmansyötön säätely | Jos lämpötila ei ole riittävän korkea, palamisreaktiot eivät voi tapahtua. Liiallinen palamisilman syöttö jäädyttää tulipesää             |
| Palamisilman määrä | Palamisilman syöttö                                   | Palamisilmaa ei ole riittävästi reaktioihin, jolloin palaminen on epätäydellistä. Jos ilmaa on liikaa, lämmönsiirron hyötysuhde heikkenee |
| Sekoittuminen      | Tulipesän muotoilu ja palamisilman syöttö             | Jos palamisilma ei sekoitu pyrolyysikaasujen kanssa, ilma- ja pyrolyysikaasuvirtaukset kanavoituvat eikä reaktioita pääse tapahtumaan     |

## 5.2 Energiatase

Kamiinan energiataaseessa kuvassa 5 kamiinaan tuodaan polttoainetta ja palamisilmaa. Tulipesässä on palamisreaktio, jossa polttoaine palaa. Palamisessa muodostuu lämpöä, jota saadaan hyödynnettyä veden lämmittämiseen. Reaktiossa muodostuu myös hyödyntämätöntä häviölämpöä, joka menee savukaasujen mukana ulkoilmaan. Kamiinaa ympäröi lämpöeristetty vesivaippa, joten joh-

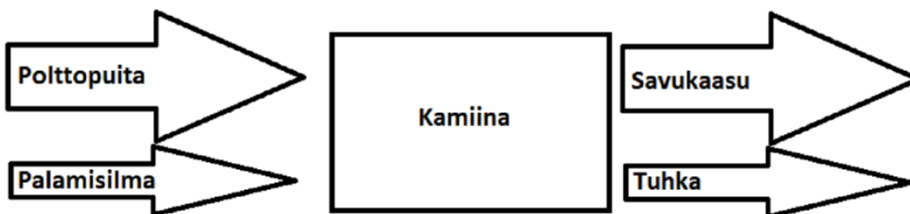
tumishäviöt pysyvät kokonaisuutta ajatellen pienenä. Tulipesän luukun suunnittelussa on hyvä huomioida lämpöhäviöiden pienentämiseen liittyviä asioita.



KUVA 5. Kamiinan energiatase

### 5.3 Massatase

Kuvan 6 massatase piirros kuvaa kamiinaan vietyjä ja poistuvia massavirtoja. Kamiinaan laitetaan palamaan puita ja luukun kautta virtaa palamisilmaa luonnonvetoisesti. Poistuvia ainevirtoja ovat savukaasu ja tuhka. Tuhkan osuus pieni toisiin ainevirtoihin verrattuna. Se ei vie mukanaan lämpöenergiaa, koska tuhka tyhjenetään kamiinan ollessa kylmillään.



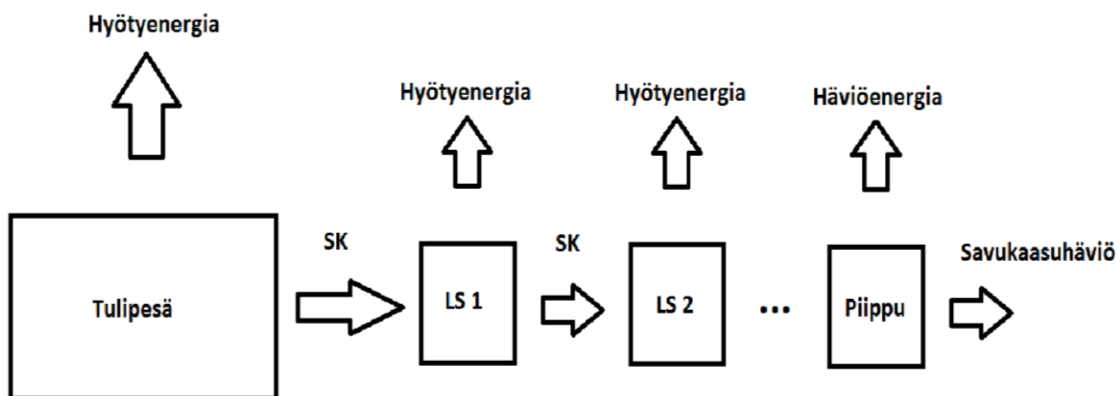
KUVA 6. Kamiinan massatase

### 5.4 Lämmönsiirtotehon laskemisen periaate

Lämmönsiirtotehon ratkaisemiseksi kamiina jaetaan sopiviin kokonaisuuksiin, jotka voidaan laskennassa ajatella peräkkäisiksi lämmönsiirtimiksi. Ensimmäinen lämmönsiirrin on tulipesä, josta savukaasut lähtevät virtaamaan savupiippua kohden. Aluksi lasketaan tulipesän adiabaattinen lämpötila, josta se alkaa pudota seinämän läpi vaippaan siirtyvän lämpövirran vuoksi. Tulipesässä on todellisuudessa pieniä häviövirtoja, mutta tässä laskennassa ne on arvioitu pieniksi.

Savukaasut kulkeutuvat tulipesästä ensimmäiselle lämmönsiirtimelle. Lämmönsiirrin yksi kykenee tulipesän tavoin siirtämään tietyn verran lämpöenergiaa savukaasuista lämmitettävään veteen. Savukaasujen lämpötila putoaa lämmönsiirtymisen seurauksena ja jatkaa seuraavaan lämmönsiirtimeen, jossa toistuu sama ilmiö.

Kuvassa 7 savukaasun lämpötila alenee lämmönsiirtimien läpi virratessaan ja tulee lopulta lämpötilaansa pudottaneena savupiippuun. Savupiipun kyljestä ulkoilmaan siirtyvä lämpöenergia on häviöenergiaa samoin kuin piipusta tuleva savukaasu, jota sanotaan savukaasuhäviöksi. Savukaasuhäviö vaikuttaa suuresti kamiinan kokonaishyötysuhteeseen. Hyötysuhteen määrittämisessä on käytetty epäsuoraa menetelmää, jossa merkityksellisiä tekijöitä ovat polttoaineteho ja savukaasuhäviö.



KUVA 7. Lämmönsiirtotehon laskennan periaatekuva, jossa hyötyenergia kuvaa uima-altaan tai kylpytynnyrin lämmittämiseen käytettyä energiaa

## 5.5 Laskentakaavat

Savukaasuteho lasketaan kaavalla 1 (5).

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

KAAVA 1

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

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

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

Lämpövirta seinämän läpi voidaan laskea kaavalla 2 (10, s. 151).

$$\dot{Q} = k * A * \Delta T$$

KAAVA 2

$k$  = lämmönläpäisykerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$A$  = lämmönvaihtopinnan pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = väliaineiden lämpötilaero (K)

Lämmönläpäisykerroin voidaan laskea kaavalla 3 (10, s. 151).

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma \left( \frac{s}{\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_2}}$$

KAAVA 3

$\alpha_1$  = lämmönsiirtymiskerroin ensimmäiselle väliaineelle (W/m<sup>2</sup>K)

$s$  = seinämän paksuus (m)

$\lambda$  = lämmönjohtavuus (W/mK)

$\alpha_2$  = lämmönsiirtymiskerroin toiselle väliaineelle (W/m<sup>2</sup>K)

Lämmönläpäisykerroin putkelle lasketaan kaavalla 4 (10, s. 151).

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \frac{A_a}{A_i} + \frac{s}{\lambda} \frac{A_a}{A_m} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

KAAVA 4

$k_a$  = lämmönläpäisykerroin

$\alpha_i$  = lämmönsiirtymiskerroin putken sisäpuoliselle fluidille (W/m<sup>2</sup>K)

$A_a$  = putken ulkopinnan pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$A_i$  = putken sisäpinnan pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$A_m$  = putken keskimääräinen pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$\alpha_a$  = lämmönsiirtymiskerroin putken ulkopuolen fluidille (W/m<sup>2</sup>K)

Keskimääräinen pinta-ala  $A_m$  saadaan kaavalla 5 (10, s. 151).

$$A_m = \frac{A_a - A_i}{\ln \frac{A_a}{A_i}}$$

KAAVA 5

$A_a$  = ulkopinta-ala (m<sup>2</sup>)

$A_i$  = sisäpinta-ala (m<sup>2</sup>)

Logaritminen lämpötilaero lasketaan kaavalla 6 (10, s. 154).

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{gr} - \Delta T_{kl}}{\ln \frac{\Delta T_{gr}}{\Delta T_{kl}}} \quad \text{KAAVA 6}$$

$\Delta T_{gr}$  = suurin lämpötilaero (K)

$\Delta T_{kl}$  = pienin lämpötilaero (K)

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 7 (10).

$$Re = \frac{v_d * L}{\nu} = \frac{v_d * x}{\nu} = \frac{v_d * d}{\nu} = \frac{v_d * d_h}{\nu} \quad \text{KAAVA 7}$$

$v_d$  = virtauksen nopeus (m/s)

$L$  = pituus (m)

$x$  = karakteristinen läpimitta (m)

$d$  = halkaisija (m)

$d_h$  = hydraulinen halkaisija (m)

$\nu$  = kinemaattinen viskositeetti (m<sup>2</sup>/s)

Rengasmaisen raon hydraulinen halkaisija  $d_h$  lasketaan kaavalla 8 (10, s. 172).

$$d_h = d_a - d_i \quad \text{KAAVA 8}$$

$d_a$  = suuremman putken sisähalkaisija (m)

$d_i$  = pienemmän putken ulkohalkaisija (m)

Säteilyn lämmönsiirtymiskerroin  $\alpha_{str}$  lasketaan kaavalla 9 (10, s. 139).

$$\alpha_{str} = f_{str} * \varepsilon_1 * \varepsilon_2 * \varphi_{12} * C_s \quad \text{KAAVA 9}$$

$f_{str}$  = lämpötilakerroin (K<sup>3</sup>)

$\varepsilon_1$  = aineen 1. emissiviteetti

$\varepsilon_2$  = aineen 2. emissiviteetti

$\varphi_{12}$  = näkyvyyskerroin

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

Lämpötilakerroin  $f_{str}$  lasketaan kaavalla 10 (10, s. 139).

$$f_{str} = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \quad \text{KAAVA 10}$$

$T_1$  = lämpötila alussa (K)

$T_2$  = lämpötila lopussa (K)

Ekvivalentti kerrospaksuus  $s_{gl}$  lasketaan kaavalla 11 (10, s. 131).

$$s_{gl} = f * \frac{4 * V_g}{A_g} \quad \text{KAAVA 11}$$

$V_g$  = kaasumassan tilavuus ( $m^3$ )

$A_g$  = kaasumassan pinta-ala ( $m^2$ )

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

Savukaasujen likimääräinen emissiivisyys  $\varepsilon_g$  lasketaan kaavalla 12. Vesihöyry ja hiilidioksidi ovat säteileviä savukaasukomponentteja. Näiden säteilyvyöt menevät osittain päällekkäin, jolloin muodostuu 2...7 % heikentyminen yksittäissäteilyjen summaan. Heikennystekijä huomioidaan kertoimella 0,95. (10, s. 133.)

$$\varepsilon_g \approx 0,95 * (\varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2}) \quad \text{KAAVA 12}$$

$\varepsilon_{H_2O}$  = vesihöyryn emissiivisyys

$\varepsilon_{CO_2}$  = hiilidioksidin emissiivisyys

Grashofin luku lasketaan, kun ( $0,5 < Pr < 50$ ) kaavalla 13 (10, s. 82).

$$Gr = \frac{g * L^3 * \frac{\rho_y - \rho_v}{\rho_v}}{v^2} \quad \text{KAAVA 13}$$

$g$  = putoamiskiihtyvyyys ( $m/s^2$ )

$L^3$  = pituus (m)

$\rho_y$  = tiheys seinämän lämpötilassa ( $kg/m^3$ )

$\rho_v$  = tiheys omassa lämpötilassa ( $kg/m^3$ )

$v^2$  = kinemaattinen viskositeetti ( $m^2/s$ )

Putkinipun lävitse menevän savukaasuvirtauksen vapaassa välitilassa vallitseva nopeus lasketaan kaavalla 14 (10, s. 76).

$$w_\psi = \frac{w_0}{\psi} \quad \text{KAAVA 14}$$

$w_0$  = virtaavan aineen nopeus ennen putkinippua (m/s)

$\psi$  = välitilaosuus

Välitilaosuus lasketaan kaavalla 15, kun  $b \geq 1$  (10, s. 76).

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot a} \quad \text{KAAVA 15}$$

Edelliseen kaavaan tarvittava  $a$  lasketaan kaavalla 16 (10, s. 77).

$$a = \frac{s_1}{d} \quad \text{KAAVA 16}$$

$s_1$  = virtausta kohden poikittain olevien putkien keskikohtien etäisyys (m)

$d$  = putken ulkohalkaisija (m)

Poikittaisen putkinipun läpi menevän virtauksen Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 17 (10, s. 78).

$$Re_{L'} = \frac{w_\psi}{\nu} * L' \quad \text{KAAVA 17}$$

$w_\psi$  = vapaan välitilan virtausnopeus (m/s)

$\nu$  = savukaasun kinemaattisen viskositeetin keskiarvo (m<sup>2</sup>/s)

$L'$  = virtausmatka (m)

Virtausmatka  $L'$  lasketaan kaavalla 18 (10, s. 91).

$$L' = d_u * \frac{\pi}{2} \quad \text{KAAVA 18}$$

$d_u$  = putken ulkohalkaisija (m)

Nusseltin luku lasketaan kaavalla 19, joka pätee  $1 < Re < 10^3$  ja  $0,6 < Pr < 1000$  (10, s. 75).

$$Nu_{L',lam} = 0,664 * \sqrt{Re_{L'}} * \sqrt[3]{Pr} \quad \text{KAAVA 19}$$

$Pr$  = Prandtlin luvun keskiarvo

$Re_{L'}$  = poikittaisen putkinipun lävitse menevän virtauksen tai tasomaisen levyn Reynoldsin luku

Nusseltin luku lasketaan kaavalla 20, joka pätee  $10^5 < Re_{L'} < 10^7$  ja  $0,6 < Pr < 100$  (10, s. 75).

$$Nu_{L',turb} = 0,037 * Re_{L'}^{0,8} * Pr^{0,48} \quad \text{KAAVA 20}$$

$Pr$  = Prandtlin luvun keskiarvo

$Re_L$  = poikittaisen putkinipun lävitse menevän virtauksen tai tasomaisen levyn Reynoldsin luku

Koko  $Re_L$  -alueen kattava Nusseltin luvun kaava 21 (10, s. 75).

$$Nu_L = \left( \tilde{Nu}_L + \sqrt{Nu_{L,lam}^2 + Nu_{L,turb}^2} \right) * f_{2,9} \quad \text{KAAVA 21}$$

$\tilde{Nu}_L$  = poikittaisella sylinterillä  $\approx 0,3$  ja levyllä  $\approx 0$

$f$  = lämpövirran suunnan kerroin

Lämpövirran suunnan kerroin kaasuille lasketaan kaavalla 22 (10, s. 75).

$$f_g = \left( \frac{T}{T_w} \right)^{0,12} \quad \text{KAAVA 22}$$

$T$  = lämpötilan keskiarvo (K)

$T_w$  = seinämän lämpötila (K)

Nipun keskimääräinen Nusseltin luku lasketaan kaavalla 23 (10, s. 78).

$$Nu_{nippu} = f_A * Nu_L \quad \text{KAAVA 23}$$

$f_A$  = putkijärjestyskerroin

$Nu_L$  = Nusseltin luku

Putkijärjestyskerroin tilanteessa, jossa rivien määrä on alle kymmenen ( $n < 10$ ), lasketaan kaavalla 24 (10, s. 78).

$$f_A = \frac{1 + (n-1) * f_{A,fl}}{n} \quad \text{KAAVA 24}$$

$n$  = putkirivien lukumäärä

$f_{A,fl}$  = putkinippukerroin

Putkinippukerroin lasketaan linjassa oleville putkiriveille kaavalla 25 (10, s. 78).

$$f_{A,fl} = 1 + \frac{0,7}{\psi^{1,5}} * \frac{\left(\frac{b}{a} - 0,3\right)}{\left(\frac{b}{a} + 0,7\right)^2} \quad \text{KAAVA 25}$$

$\psi$  = välitilaosuus



$a$  = putkien leveyssuunnan etäisyyksistä riippuva arvo

$b$  = putkien virtaukseen nähden pituussuunnan etäisyydestä riippuva arvo

Kerroin  $b$  lasketaan kaavalla 26 (10, s. 77).

$$b = \frac{s_2}{d} \quad \text{KAAVA 26}$$

$s_2$  = putkien väli keskikohdista virtaussuuntaan mitattuna (m)

$d$  = putken ulkohalkaisija (m)

Putkinipun lämmönsiirtymiskerroin lasketaan kaavalla 27 (10, s. 78).

$$\alpha_{nippu} = Nu_{nippu} * \frac{\lambda}{L} \quad \text{KAAVA 27}$$

$\lambda$  = savukaasun keskimääräinen lämmönjohtavuus (W/mK)

Hydraulinen halkaisija U-palkin muotoiselle kappaleelle lasketaan kaavalla 28 (10, s. 71).

$$d_h = \frac{4 * a * b}{a + 2b} \quad \text{KAAVA 28}$$

$a$  = leveys (m)

$b$  = korkeus (m)

Savukaasujen ominaislämpökapasiteetti lasketaan kaavalla 29 (2, s. 97).

$$c_{psk} = \sum x_j * c_{pj} \quad \text{KAAVA 29}$$

$x_j$  = tietyn kaasukomponentin massaosuus

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

Savukaasujen lämmönjohtavuus lasketaan kaavalla 30 (2, s. 97).

$$\lambda_{sk} = 0,5 * \left( \sum x_n * \lambda_n + \frac{1}{\sum \frac{x_n}{\lambda_n}} \right) \quad \text{KAAVA 30}$$

$x_n$  = komponentin  $n$  osuus

$\lambda_n$  = komponentin  $n$  lämmönjohtavuus

Savukaasun dynaaminen viskositeetti lasketaan kaavalla 31 (2, s. 98).

$$\eta = \frac{\frac{\sum \eta_n * x_n}{\sqrt{M_n}}}{\frac{\sum x_n}{\sqrt{M_n}}}$$

KAAVA 31

$x_j$  = tietyn kaasukomponentin osuus

$M_n$  = kaasukomponentin molekyylipaino

Savukaasun kinemaattinen viskositeetti lasketaan kaavalla 32 (12, s. 16).

$$\nu = \frac{\eta_{sk}}{\rho_{sk}}$$

KAAVA 32

$\eta_{sk}$  = savukaasun dynaaminen viskositeetti (kg/m\*s)

$\rho_{sk}$  = savukaasun tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

Savukaasun tiheys lasketaan kaavalla 33 (2, s. 99).

$$\rho_{sk} = \sum x_n * \rho_n$$

KAAVA 33

$\rho_n$  = kaasukomponentin tiheys

$x_n$  = komponentin osuus

Savukaasun Prandtin luku lasketaan kaavalla 34 (12, s. 17).

$$Pr_{sk} = \sum (x_n * Pr_n)$$

KAAVA 34

$x_n$  = komponentin osuus (%)

$Pr_n$  = kaasukomponentin Prandtin luku

Savukaasun tiheys tietyssä lämpötiloissa lasketaan kaavalla 35 (2, s. 99).

$$\rho_x = \rho_0 * \frac{T_0}{T_x}$$

KAAVA 35

$\rho_0$  = tiheys normaalitilassa ( $T_0=273K$ )

$T_0$  = normaalitilan lämpötila 273K

$T_x$  = tietty lämpötila (K)

Nusseltin luku voidaan laskea lyhyelle putkelle kaavalla 36, kun  $d < L < 10d_s$  ja  $Re_d < 2800$  (10, s. 67).

$$Nu_{d,lam} = 0,664 \sqrt{Re_d * \frac{d}{L}} * \sqrt[3]{Pr}$$

KAAVA 36

$Re_d$  = Reynoldsin luku

$d$  = halkaisija (m)

$L$  = pituus (m)

$Pr$  = Prandtin luku

Nusseltin luku lyhyelle putkelle lasketaan kaavalla 37 pituussuhteen ollessa  $d/L > 0,1$ . Kaava pätee, kun  $0,1 < Re_d * Pr * d/L = Gz < 10^4$ . (10, s. 68.)

$$Nu_{d,lam} = \sqrt[3]{3,66^3 + 1,61^3 * Gz} \quad \text{KAAVA 37}$$

$Gz$  = Graetzin luku

Nusseltin luku lasketaan kaavalla 38 virtauksen ollessa levyn pituussuunnassa ja rajakerroksen ollessa laminaarinen, kun  $Re_L < 10^5$  ja  $0,6 < Pr \leq 2000$ . (10, s. 57).

$$Nu = 0,664 * \sqrt{Re_L} * \sqrt[3]{Pr} \quad \text{KAAVA 38}$$

$Re_L$  = Reynoldsin luku

$Pr$  = Prandtin luku

Nusseltin luku putkelle lasketaan yksinkertaistetun potenssiyhtälön kaavalla 39 Reynoldsin luvun ollessa  $2300 < Re_d < 10^6$  (10, s. 68).

$$Nu_d = 0,0235 * (Re_d^{0,8} - 230) * Pr^{0,48} \quad \text{KAAVA 39}$$

$Re_d$  = Reynoldsin luku

$Pr$  = Prandtin luku

Lämmönsiirtymiskerroin  $\alpha$  lasketaan kaavalla 40 (10, s. 52).

$$\alpha = Nu_x * \frac{\lambda}{x} \quad \text{KAAVA 40}$$

$Nu_x$  = Nusseltin luku

$\lambda$  = lämmönjohtavuus (W/m\*K)

$x$  = karakteristinen mitta



$m_x$  = polttoainekomponentin paino-osuus (kg/kg<sub>pa</sub>)

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

Hyötysuhde lasketaan kaavalla 45 (2, s. 104).

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{häviö}}}{\dot{Q}_{\text{tuotu}}} \quad \text{KAAVA 45}$$

$\dot{Q}_{\text{häviö}}$  = häviöteho (kW)

$\dot{Q}_{\text{tuotu}}$  = polttoaineteho (kW)

Savupiipun kehittämä alipaine lasketaan kaavalla 46 (2, s. 248).

$$\Delta p = (\rho_i - \rho_{sk}) * g * l - \frac{1}{2} * \rho_{sk} * v_{sk}^2 * (\lambda * \frac{l}{d} + 1) \quad \text{KAAVA 46}$$

$\Delta p$  = piipun kehittämä alipaine (Pa), (veto)

$\rho_i$  = ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{sk}$  = savukaasun tiheys savukaasun lämpötilassa (kg/m<sup>3</sup>)

$l$  = piipun korkeus (m)

$d$  = piipun sisähalkaisija (m)

$g$  = maan vetovoiman kiihtyvyys, (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$v_{sk}$  = savukaasun virtausnopeus hormissa (m/s)

$\lambda$  = piipun vastuskerroin

Vastuskerroin sileälle putkelle lasketaan Blasiuksen kaavalla 47, joka pätee, kun  $400 < Re < 100000$  (13, s. 119).

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad \text{KAAVA 47}$$

Virtauksessa poikittain olevan putkipatterin painehäviö lasketaan kaavalla 48 (14, s. 427).

$$\Delta p = N_L * x * \left( \frac{\rho * v_{max}^2}{2} \right) * f \quad \text{KAAVA 48}$$

$N_L$  = putkien lukumäärä pitkittäisessä linjassa

$x$  = korjauskerroin

$\rho$  = virtaavan aineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$V_{max}$  = virtaavan aineen maksiminopeus

$f$  = kitkakerroin

Kaavassa 49 tarvittavan fluidin maksiminopeus lasketaan limittäiselle putkijärjestykselle kaavalla 46, kun  $2(S_D - D) \geq (S_T - D)$  (16, s. 6).

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} * V$$

KAAVA 49

$S_T$  = putkien poikittainen väli keskikohdista mitattuina (kuva 13)

$D$  = putken ulkohalkaisija

$V$  = virtausnopeus ennen putkinippua (m/s)

Kertavastuksen painehäviö lasketaan kaavalla 50 (17).

$$\Delta p_{\zeta} = \Sigma \zeta * \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

KAAVA 50

$\Sigma \zeta$  = kertavastus summa

$\rho$  = virtaavan aineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = virtausnopeus (m/s)

## 5.6 Savukaasulasku

Taulukossa 3 on laskettu puun sisältämien komponenttien ainemäärät kuivassa polttoaineessa. Sarakkeessa 2 ainemäärät on 20 %:n kosteudessa olevalle polttoaineelle, joka on saatu kertomalla kuiva-ainepitoisuudet 0,8:lla. Jakamalla kostean polttoaineen ainemäärät molekyylipainoilla tiedetään aineiden moolimäärät polttoainekiloa kohden. Oikeanpuolimmaisessa sarakkeessa näkyy komponentin palamisessa tarvittava teoreettinen happimäärä, jonka määrä perustuu komponentin palamisreaktioyhtälöön.

TAULUKKO 3. Savukaasulaskun alkuvaihe

| Komponentti       | [kg/kg pa]                      | [kg/kg pa]                     | [kg/kmol]                  | [kmol/kg pa]      | [kmol/kg pa] |
|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------|
|                   | Osuudet kuivassa polttoaineessa | Kostean polttoaineen ainemäärä | Komponentin molekyylipaino | Kostea polttoaine | O2-tarve     |
| C                 | 0,504                           | 0,4032                         | 12,01                      | 0,033572          | 0,033572023  |
| H2                | 0,062                           | 0,0496                         | 2,016                      | 0,024603          | 0,012301587  |
| O2                | 0,425                           | 0,34                           | 32                         | 0,010625          | -0,010625    |
| N2                | 0,005                           | 0,004                          | 28,02                      | 0,000143          | 0            |
| O2 tarve yhteensä |                                 |                                |                            |                   | 0,035248611  |
| H2O               |                                 | 0,2                            | 18,06                      | 0,011074          |              |

Ilma sisältää puhdasta happea 21 % ja typpeä 79 %. Kaavalla 13 lasketaan teoreettinen palamisilmamäärä polttoainekiloa kohden.

$$\frac{N_{i(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}} = 0,0352486 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} * \frac{1}{0,21} = 0,167850527 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}}$$

Teoreettisen ilmamäärän happimäärä lasketaan kaavalla 14.

$$\frac{N_{o2(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}} = 0,167850527 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} * 0,21 = 0,035248611 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}}$$

Teoreettisen ilmamäärän typpimäärä lasketaan vähentämällä hapen osuus teoreettisesta ilmamäärästä.

$$\frac{N_{N2(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}} = (0,167850527 - 0,035248611) \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} = 0,132601916 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}}$$

Teoreettinen palamisilmamäärä kilogrammoina polttoainekiloa kohden saadaan summalausekkeesta, jossa typpi ja happi kerrotaan omilla molekyylipainoillaan.

$$\begin{aligned} \frac{m_i}{m_{pa}} &= 32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} * 0,035248611 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} + 28,02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} * 0,132601916 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} \\ &= 4,84346123 \frac{\text{kg}_{ilmaa}}{\text{kg}_{pa}} \end{aligned}$$

Ilmamäärä saadaan kuutiometreiksi kertomalla moolimäärä moolitilavuudella.

$$\frac{V_i}{m_{pa}} = 22,4 \frac{m^3}{kg_{pa}} * 0,167850527 \frac{kmol}{kg_{pa}} = 3,759851799 \frac{m^3}{kg_{pa}}$$

Taulukossa 4 lasketaan teoreettisessa palamisessa syntyvien savukaasujen määrä polttoainekiloa kohden. Reaktiotuotteita syntyy yhtä paljon kuin polttoaineessa on sitä synnyttävää komponenttia.

TAULUKKO 4. Teoreettisen palamisen savukaasumäärät

| Komponentti | Komponentin määrä kosteassa polttoainessa | Reaktiotuote | Syntyvien savukaasujen määrä | Osuus kuivissa savukaasuissa | Osuus kosteissa savukaasuissa |
|-------------|---|--------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
|             | [kmol/kg pa]                              |              | [kmol/kg pa]                 | [%]                          | [%]                           |
| C           | 0,033572023                               | CO2          | 0,033572                     | 20,19375                     | 16,62582795                   |
| H2          | 0,024603175                               | H2O          | 0,035677                     |                              | 17,66845681                   |
| H2O         | 0,011074197                               |              |                              |                              |                               |
| O2          | 0,010625                                  |              |                              |                              |                               |
| N2          | 0,000142755                               | N2           | 0,132678                     | 79,80625                     | 65,70571525                   |
|             |   |              |                              | 100                          | 100                           |

Taulukossa 5 on laskettu savukaasujen määrät kilogrammoiksi kertomalla aineiden moolimäärät molekyylipainoilla. Tilavuus kuutiometreinä tulee kertolaskusta, jossa moolimäärät kerrotaan komponenttien moolitilavuuksilla.

TAULUKKO 5. Savukaasujen määrät kilogrammoina ja kuutiometreinä

| Komponentti | Määrä savukaasuissa | Molekyylipaino | Määrä savukaasuissa | Moolitilavuus | Määrä savukaasuissa |
|-------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------|---------------------|
|             | [kmol/kg pa]        | [kg/kmol]      | [kg/kg pa]          | [m3/kmol]     | [m3/kgpa]           |
| CO2         | 0,033572023         | 44,01          | 1,477505            | 22,26         | 0,747313239         |
| H2O         | 0,035677372         | 18,016         | 0,642764            | 22,4          | 0,799173127         |
| N2          | 0,132677531         | 28,02          | 3,717624            | 22,4          | 2,971976696         |
| YHT         | 0,201926926         |                | 5,837893            |               | 4,518463062         |



Savukaasulaskennassa voidaan ajatella, että ilmaylimäärä siirtyy suoraan savukaasuihin ja savukaasut muodostavat ilmakertoimella ( $\lambda=1$ ) laskettujen teoreettisen palamisen ja ilmaylimäärän summa. (2.)

$$\begin{aligned} \text{Ilmaylimäärä: } (\lambda - 1) * \frac{N_{i(\text{teoreettinen})}}{m_{pa}} &= (2 - 1) * 0,167850527 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} \\ &= 0,167850527 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} \end{aligned}$$

$$\text{Happimäärä: } 0,21 * 0,167850527 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} = 0,035248611 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}}$$

$$\text{Typpimäärä: } 0,79 * 0,167850527 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}} = 0,132601916 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{pa}}$$

Palamisessa syntyvät todelliset ainemäärät on laskettu taulukossa 6. Laskennassa olevan ilmaylimäärän ajatellaan siirtyvän suoraan savukaasuihin eli savukaasu muodostuu teoreettisen palamisen savukaasujen ja ilmaylimäärän summa. Laskennan ilmakerroin on 2. Savukaasumäärät saadaan muutettua kiloiksi kertomalla savukaasukomponenttien moolimäärät molekyylipainoillaan. Vastaavasti tilavuus kuutiometreiksi saadaan kertomalla moolimäärät omilla moolitilavuuksillaan.

*TAULUKKO 6. Todelliset savukaasumäärät mooleina, kilogrammoina ja kuutiometreinä*

| Komponentti      | Määrä ( $\lambda=1$ )<br>savukaasuissa | Ilmaylimäärä | Yhteensä     | Yhteensä     | Yhteensä   |
|------------------|--|--------------|--------------|--------------|------------|
|                  | [kmol/kg pa]                           |              | [kmol/kg pa] | [kmol/kg pa] | [kg/kg pa] |
| CO <sub>2</sub>  | 0,033572                               |              | 0,033572     | 1,47750475   | 0,752013   |
| H <sub>2</sub> O | 0,0356774                              |              | 0,0356774    | 0,64276353   | 0,799173   |
| N <sub>2</sub>   | 0,1326775                              | 0,132601916  | 0,2652794    | 7,43313011   | 5,94226    |
| O <sub>2</sub>   |  | 0,035248611  | 0,0352486    | 1,12795554   | 0,789569   |
| YHT              |  |              | 0,3697775    | 10,6813539   | 8,283015   |

Taulukossa 7 on laskettu taulukon 6 tietoihin perustuen mooliosuudet kosteissa ja kuivissa savukaasuissa.

*TAULUKKO 7. Mooliosuudet ja massaosuudet kosteissa savukaasuissa*

|                  | Osuudet kosteissa savukaasuissa | Massaosuus kosteissa savukaasuissa |
|------------------|---------------------------------|------------------------------------|
|                  | [%]                             | [%]                                |
| CO <sub>2</sub>  | 0,0907898                       | 0,138325605                        |
| H <sub>2</sub> O | 0,0964834                       | 0,060176222                        |
| N <sub>2</sub>   | 0,717403                        | 0,695897745                        |
| O <sub>2</sub>   | 0,0953239                       | 0,105600427                        |
| YHT              | 1                               | 1                                  |

Savukaasun tiheys lasketaan kaavalla 33. Komponenttien mooliosuudet saadaan taulukosta 7. Kaasujen normaalitilan tiheydet on poimittu Höyrykattilat kirjasta. Normaalitila tarkoittaa tässä tapauksessa tilannetta, jossa lämpötila on 0 °C ja paine 101,325 kPa.

$$\rho_{sk} = 0,090789806 * 1,9770 \frac{kg}{m^3} + 0,096483362 * 0,802 \frac{kg}{m^3} + 0,717402982 * 1,2505 \frac{kg}{m^3} + 0,09532385 * 1,4290 \frac{kg}{m^3} = 1,29201711 \frac{kg}{m^3}$$

Savukaasun normaalitilan tiheyden perusteella lasketaan kaavalla 30 tiheydet eri lämpötiloissa, jotka näkyvät taulukossa 8. Taulukossa on laskettu savukaasun tilavuusvirtoja, jotka muuttuvat suuremmaksi, koska massavirran pitää pysyä samana.

TAULUKKO 8. Savukaasun tiheys ja tilavuusvirta eri lämpötiloissa

| [°C] | [kg/m <sup>3</sup> ] |             | [m <sup>3</sup> /h] | [m <sup>3</sup> /s] |
|------|----------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| T    | ρ sk                 | kerroin     | V sk                | Vsk                 |
| 0    | 1,2920171            |             | 41,41507472         | 0,01150419          |
| 100  | 0,9456318            | 1,366300366 | 56,58543176         | 0,01571818          |
| 200  | 0,7457097            | 1,732600733 | 71,7557888          | 0,01993216          |
| 300  | 0,6155684            | 2,098901099 | 86,92614584         | 0,02414615          |
| 400  | 0,524102             | 2,465201465 | 102,0965029         | 0,02836014          |
| 500  | 0,456301             | 2,831501832 | 117,2668599         | 0,03257413          |
| 600  | 0,4040328            | 3,197802198 | 132,437217          | 0,03678812          |
| 700  | 0,3625084            | 3,564102564 | 147,607574          | 0,0410021           |
| 800  | 0,3287238            | 3,93040293  | 162,777931          | 0,04521609          |
| 900  | 0,3006996            | 4,296703297 | 177,9482881         | 0,04943008          |
| 1000 | 0,2770783            | 4,663003663 | 193,1186451         | 0,05364407          |
| 1100 | 0,2568978            | 5,029304029 | 208,2890022         | 0,05785806          |
| 1200 | 0,2394573            | 5,395604396 | 223,4593592         | 0,06207204          |

Savukaasun ominaislämpökapasiteetit on laskettu kaavalla 29. Kaavassa tarvittavat komponenttien ominaislämpökapasiteetit ovat taulukossa 9. Massaosuudet saadaan taulukosta 7.

TAULUKKO 9. Savukaasun ominaislämpökapasiteetit (2, s. 98)

| [°C] | [kJ/kgK]        | [kJ/kgK]         | [kJ/kgK]       | [kJ/kgK]       | [kJ/kgK] |
|------|-----------------|------------------|----------------|----------------|----------|
| T    | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | SK       |
| 0    | 0,819           | 1,855            | 1,039          | 0,914          | 1,044472 |
| 100  | 0,871           | 1,867            | 1,043          | 0,925          | 1,056332 |
| 200  | 0,917           | 1,888            | 1,047          | 0,934          | 1,067693 |
| 300  | 0,959           | 1,909            | 1,051          | 0,95           | 1,07924  |
| 400  | 0,988           | 1,939            | 1,059          | 0,967          | 1,092419 |
| 500  | 1,022           | 1,968            | 1,068          | 0,98           | 1,106503 |
| 600  | 1,051           | 1,997            | 1,076          | 0,992          | 1,119094 |
| 700  | 1,072           | 2,031            | 1,084          | 1,005          | 1,130985 |
| 800  | 1,093           | 2,064            | 1,097          | 1,017          | 1,146189 |
| 900  | 1,114           | 2,102            | 1,11           | 1,026          | 1,161378 |
| 1000 | 1,13            | 2,131            | 1,12           | 1,038          | 1,173562 |
| 1100 | 1,147           | 2,165            | 1,13           | 1,043          | 1,185447 |
| 1200 | 1,16            | 2,194            | 1,139          | 1,051          | 1,196098 |

Savukaasun lämmönjohtavuus on laskettu taulukossa 10 kaavalla 30. Laskennassa tarvittavat savukaasukomponenttien lämmönjohtavuudet ovat Fundamentals of heat and mass transfer -kirjan loppuosiossa olevista taulukoista (14). Lämmönjohtavuuden arvoja on myös Lämmönsiirto-kirjassa (10, s. 196–200). Hiilidioksidin arvoihin ei lähteen lämpötila-alue riittänyt, joten laajensin sitä arvoista muodostetun funktion avulla. Vesihöyryn arvot on laskettu veden neste-höyry laskimella. Savukaasukomponenttien osuudet nähdään taulukosta 7.

*TAULUKKO 10. Savukaasun lämmönjohtavuus*

| [°C] | [W/mK]   | [W/mK] | [W/mK]  | [W/mK]  | [W/mK]   |
|------|----------|--------|---------|---------|----------|
| T    | N2       | O2     | CO2     | H2O     | SK       |
| 0    | 0,023902 | 0,0243 | 0,015   | 0,0552  | 0,026151 |
| 100  | 0,0312   | 0,0314 | 0,02275 | 0,02478 | 0,029832 |
| 200  | 0,03727  | 0,0386 | 0,03    | 0,03337 | 0,03636  |
| 300  | 0,043    | 0,0454 | 0,039   | 0,04349 | 0,042913 |
| 400  | 0,0485   | 0,0516 | 0,047   | 0,05471 | 0,049258 |
| 500  | 0,0535   | 0,057  | 0,053   | 0,0669  | 0,055081 |
| 600  | 0,0634   | 0,0621 | 0,0619  | 0,0799  | 0,064732 |
| 700  | 0,0636   | 0,068  | 0,0697  | 0,09357 | 0,067465 |
| 800  | 0,0686   | 0,074  | 0,0775  | 0,10772 | 0,073697 |
| 900  | 0,0742   | 0,08   | 0,0853  | 0,1228  | 0,08045  |
| 1000 | 0,08     | 0,085  | 0,0931  | 0,1388  | 0,087339 |

Savukaasun dynaaminen viskositeetti lasketaan kaavalla 31. Kaavassa tarvittavat komponenttien dynaamiset viskositeetit on laskettu kaasujen viskositeettilaskimella (15) (taulukko 11). Kinemaattinen viskositeetti on laskettu kaavalla 29.

TAULUKKO 11. Savukaasun dynaaminen ja kinemaattinen viskositeetti

| [°C] | [kg/ms]         | [kg/ms]          | [kg/ms]        | [kg/ms]        | [kg/ms]     | [m <sup>2</sup> /s] |
|------|-----------------|------------------|----------------|----------------|-------------|---------------------|
| T    | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | SK          | SK                  |
| 0    | 0,0000138       |                  | 0,0000165      | 0,0000191      | 1,49931E-06 | 1,16044E-06         |
| 100  | 0,0000185       | 0,000012234      | 0,0000209      | 0,0000244      | 2,60782E-06 | 2,75775E-06         |
| 200  | 0,0000227       | 0,000016204      | 0,0000248      | 0,000029       | 3,20655E-06 | 4,29999E-06         |
| 300  | 0,0000265       | 0,000020313      | 0,0000282      | 0,0000332      | 3,77356E-06 | 6,1302E-06          |
| 400  | 0,0000301       | 0,000024453      | 0,0000313      | 0,000037       | 4,31454E-06 | 8,23225E-06         |
| 500  | 0,0000337       | 0,000028564      | 0,0000342      | 0,0000404      | 4,83427E-06 | 1,05945E-05         |
| 600  | 0,0000364       | 0,000032608      | 0,0000369      | 0,0000437      | 5,31957E-06 | 1,31662E-05         |
| 700  | 0,0000393       | 0,000036568      | 0,0000394      | 0,0000467      | 5,78824E-06 | 1,59672E-05         |
| 800  | 0,0000421       | 0,000040433      | 0,0000418      | 0,0000496      | 6,24268E-06 | 1,89906E-05         |
| 900  | 0,0000447       | 0,000044         | 0,000044       | 0,0000523      | 6,66263E-06 | 2,21571E-05         |
| 1000 | 0,0000472       | 0,000048         | 0,0000462      | 0,000055       | 7,10435E-06 | 2,56402E-05         |

Taulukossa 12 on laskettu savukaasun Prandtlin luku kaavalla 31. Komponenttien Prandtlin luvut on saatu lähteestä (14). Hiilidioksidin arvoja on laajennettu arvoista muodostetun funktion avulla. Vesihöyryn arvot on laskettu veden neste-höyrylaskimella.

TAULUKKO 12. Savukaasun Prandtlin lukuja

| [°C] | Pr             | Pr             | Pr              | Pr               | Pr       |
|------|----------------|----------------|-----------------|------------------|----------|
| T    | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | SK       |
| 0    | 0,7            | 0,715          | 0,765           | 13,67            | 1,95872  |
| 100  | 0,7            | 0,73           | 0,736           | 1,024            | 0,737389 |
| 200  | 0,7            | 0,735          | 0,727           | 0,959            | 0,730777 |
| 300  | 0,7            | 0,727          | 0,718           | 0,94             | 0,727364 |
| 400  | 0,7            | 0,74           | 0,715           | 0,925            | 0,726884 |
| 500  | 0,7            | 0,743          | 0,716           | 0,911            | 0,72591  |
| 600  | 0,7            | 0,7            | 0,7216          | 0,899            | 0,721161 |
| 700  | 0,7            | 0,741          | 0,73            | 0,888            | 0,724771 |
| 800  | 0,7            | 0,735          | 0,74            | 0,88             | 0,724335 |
| 900  | 0,7            | 0,728          | 0,76            | 0,871            | 0,724615 |
| 1000 | 0,7            | 0,723          | 0,778           | 0,866            | 0,72529  |

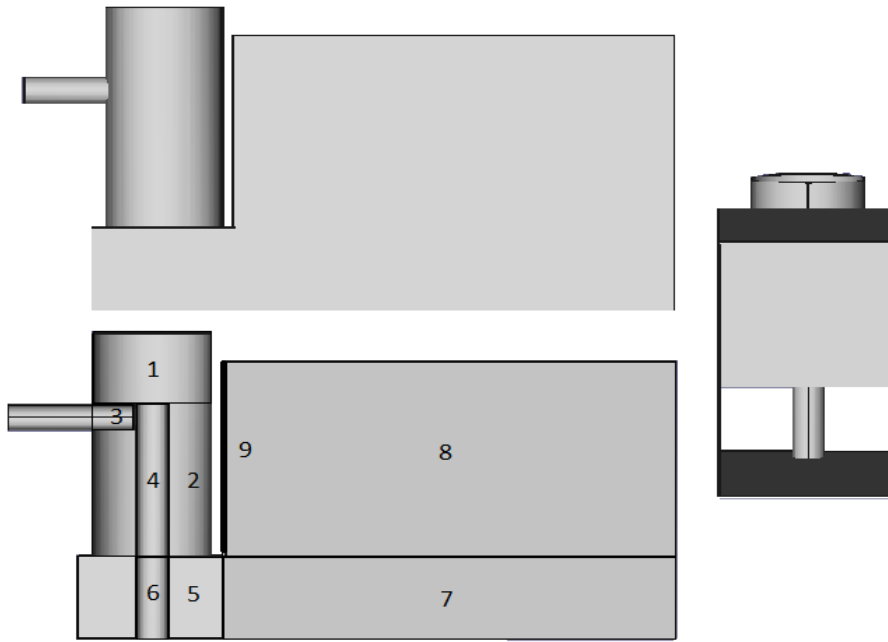
Taulukkoon 13 on koottu veden lämpötilariippuvaisia suureita: tiheyksiä, kinemaattisia viskositeetteja, lämmönjohtavuuksia ja Prandtlin luvun arvoja (10, s.199).

*TAULUKKO 13. Veden tiheys, kinemaattinen viskositeetti, lämmönjohtavuus ja Prandtl*

| [°C] | [kg/m <sup>3</sup> ] | [m <sup>2</sup> /s] | [W/mK] |       |
|------|----------------------|---------------------|--------|-------|
| T    | ρ                    | ν                   | λ      | Pr    |
| 0    | 999,8                | 0,000001792         | 0,552  | 13,67 |
| 10   | 999,7                | 0,000001307         | 0,578  | 9,47  |
| 20   | 998,2                | 0,000001004         | 0,598  | 7,01  |
| 30   | 999,5                | 0,000000801         | 0,614  | 5,43  |
| 40   | 992,2                | 0,000000658         | 0,628  | 4,35  |
| 50   | 988                  | 0,000000554         | 0,641  | 3,57  |
| 60   | 983,2                | 0,000000475         | 0,652  | 3     |
| 70   | 977,8                | 0,000000413         | 0,661  | 2,56  |
| 80   | 965,3                | 0,000000365         | 0,669  | 2,23  |
| 90   | 965,3                | 0,000000326         | 0,676  | 1,96  |
| 100  | 958,4                | 0,000000295         | 0,682  | 1,75  |

### 5.7 Savukaasutehon ja lämmönsiirtotehon laskenta

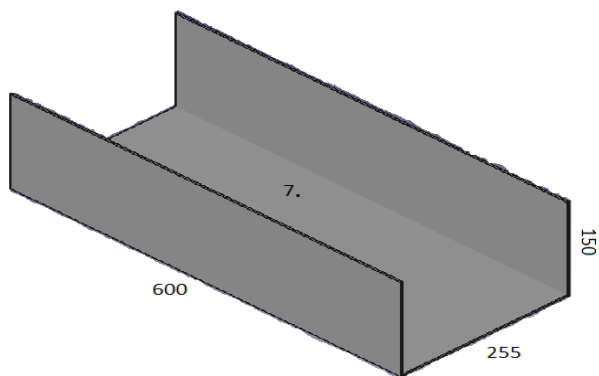
Kamiinan lämmönsiirtotehon laskenta on aloitettu jakamalla kamiina yhdeksään lämmönsiirrin kokonaisuuteen. Kuvassa 8 näkyy laskennassa käytetty lämmönsiirrin jaottelu. Lämmönsiirtotehon laskennassa on laskettu ensin tulipesän lämmönsiirtimien lämmönsiirtotehot. Tämän jälkeen tiedetään tulipesästä poistuvien savukaasujen lämpötila ja laskentaa on jatkettu siirrin kerrallaan kohti viimeistä savupiipun lämmönsiirrinosa.



*KUVA 8. Kamiinan lämmönsiirtimet*

### 5.7.1 Savukaasupuoli

Lasketaan esimerkkilasku ja valitaan laskettavaksi lämmönsiirtimeksi tulisäkökonaisuuteen kuuluva arinan alapuolinen osa. Lämmönsiirtimen kolmiulotteinen piirustus näkyy kuvassa 9.



*KUVA 9. Arinan alapuolinen lämmönsiirrin*

Polttopuun energia poltettua kilogrammaa kohden lasketaan kaavalla 44. Oletetaan, että halot on kuivatettu hyvissä olosuhteissa tarpeeksi pitkään ja niiden

kosteusosuus on 20 %. Ainepitoisuudet kostealle polttoaineelle saadaan taulukosta 3.

$$\begin{aligned} Hu(20\%) &= 34,8 \frac{Mj}{kg} * 0,4032 \frac{kg}{kgpa} + 93,8 \frac{Mj}{kg} * 0,0496 \frac{kg}{kgpa} + 6,3 \frac{Mj}{kg} \\ &\quad * 0,004 \frac{kg}{kgpa} - 10,8 \frac{Mj}{kg} * 0,34 \frac{kg}{kgpa} - 2,443 \frac{Mj}{kg} * 0,2 \frac{kg}{kgpa} \\ &= 14,54844 \frac{MJ}{kg} = 14548,44 \frac{kJ}{kg} \end{aligned}$$

Lasketaan polttoaineteho, kun palonopeus on 5 (kg/h).

$$Q_{pa} = \frac{14548,44 \frac{kJ}{kg} * 5 \frac{kg}{h}}{3600s} = 20,20616667 \text{ kW}$$

Lasketaan savukaasun massavirta. Savukaasujen määrä palanutta polttoaineki-  
loa kohden saadaan taulukosta 4.

$$\dot{m}_{sk} = \frac{10,68135393 \frac{kg}{kgpa} * 5 \frac{kg}{h}}{3600s} = 0,014835214 \frac{kg}{s}$$

Iteroidaan savukaasun lähtölämpötila kaavalla 1.

$$\dot{Q}_{sk} = 0,0148 * \left( 1,185 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * 1160 ^\circ C - 1,044 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * 20 ^\circ C \right) = 20,27 \text{ kW}$$

Tulipesän arinan alapuolisen lämmönsiirtimen lämmönsiirtoteho laskemisessa tulee alkuvaiheessa arvioida kanavassa virtaavien kaasujen määrä. Kamiinaan otetaan palamisilma ensiöilmana, jonka osuus on noin 2/3 kokonaisilmamäärästä ja loput 1/3 kokonaisilmamäärästä otetaan toisioilmana.

Ensiöilma virtaa arinan alle, jossa se kohtaa palamisprosessissa vallitsevan kuumimman kohdan. Toisioilma tulee tulipesän yläosasta, jossa se muodostaa kaasuseoksen polttopuista hahtuvien kaasujen kanssa.



Savukaasun virtausnopeus on laskettu sen tilavuusvirtausten keskiarvosta. Keskiarvo jaetaan virtausalalla, jolloin saadaan keskimääräinen virtausnopeus arinan alla.

$$v_{sk} = \frac{\left(\frac{V_{sk.alussa} + V_{sk.lopussa}}{2}\right)}{A_{virtausala}} = \frac{0,033912069 \frac{m^3}{s} + 0,045216092 \frac{m^3}{s}}{0,03825 m^2}$$

$$= 1,034355045 \frac{m}{s}$$

Lämmönsiirrin on poikkileikkausmuodoltaan U-palkin muotoinen. Hydraulinen halkaisija lasketaan kaavalla 28.

$$d_h = \frac{4 * 0,255 m * 0,15 m}{0,255 m + 2 * 0,15 m} = 0,275675676 m$$

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 7.

$$Re = \frac{1,034355045 \frac{m}{s} * 0,275675676 m}{2,56402E*10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 11121,05497$$

Nusseltin luku voidaan laskea käyttämällä lyhyen putken kaavaa 37.

$$Nu_{d,lam} = \sqrt[3]{3,66^3 + 1,61^3 * 3702,546923} = 24,9335819$$

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin lasketaan kaavalla 37.

$$\alpha_k = 24,9335819 * \frac{0,086189112 \frac{W}{m * K}}{0,275675676 m} = 7,795404086 \frac{W}{m^2 * K}$$

Lämpötilakerroin lasketaan kaavalla 10, jossa  $T_1$  = savukaasun keskilämpötila ja  $T_2$  = seinämän keskilämpötila. Lämpötilana  $T_1$  on alkulämpötilan ja arinan alta poistuvan lämpötilan keskiarvo.

$$T_1 = \frac{1160\text{ }^\circ\text{C} + 919\text{ }^\circ\text{C}}{2} = 1039,5\text{ }^\circ\text{C} \text{ ja seinämän lämpötilan keskiarvo } T_2 = \frac{90\text{ }^\circ\text{C} + 90\text{ }^\circ\text{C}}{2} = 90\text{ }^\circ\text{C}$$

Sijoitetaan  $T_1$  ja  $T_2$  lämpötilakertoimen kaavaan Kelvin -asteina.

$$f_{str} = \frac{\left(\frac{1312,5\text{ K}}{100}\right)^4 - \left(\frac{363\text{ K}}{100}\right)^4}{1312,5\text{ K} - 363\text{ K}} = 30,2346054\text{ K}^3$$

Ekvivalentti kerrospaksuus lasketaan kaavalla 11. Käytetään geometria- ja painekertoimena likiarvoa 0,9. Lasketaan kaasumassan pinta-ala ja tilavuus. Tämän jälkeen sijoitetaan arvot kaavaan.

$$A_g = 0,6\text{ m} * 0,15\text{ m} * 2 + 0,6\text{ m} * 0,255\text{ m} = 0,333\text{ m}^2$$

$$V_g = 0,6\text{ m} * 0,255\text{ m} * 0,15\text{ m} = 0,02295\text{ m}^3$$

$$s_{gl} = 0,9 * \frac{4 * 0,02295\text{ m}^3}{0,333\text{ m}^2} = 0,248108108\text{ m}$$

Savukaasun emissiivisyys lasketaan kaavalla 12. Vesihöyryn ja hiilidioksidin osapaineet kerrotaan ekvivalentilla kerrospaksuudella. Osapaineet eli moolisuudet saadaan taulukosta 5.

$$p(\text{H}_2\text{O}) = 0,096483362\text{ bar} * 0,248108108\text{ m} = 0,023938304\text{ bar} * \text{m}$$

$$p(\text{CO}_2) = 0,090789806\text{ bar} * 0,248108108\text{ m} = 0,022525687\text{ bar} * \text{m}$$

Emissiivisyydet vesihöyrylle ja hiilidioksidille luetaan kuvaajasta ja saadaan emissiivisyyden arvoiksi  $\epsilon(\text{H}_2\text{O}) = 0,035$  ja  $\epsilon(\text{CO}_2) = 0,006$ . Käytetään teräksen emissiivisyytenä  $\epsilon = 0,6$ . (4)

$$\epsilon_g \approx 0,95 * (0,035 + 0,006) = 0,09025$$

Säteilyn lämmönsiirtymiskerroin lasketaan kaavalla 9.

$$\alpha_{str} = 30,2346054\text{ K}^3 * 0,09025 * 0,6 * 1 * 5,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}^4} = 9,282946013 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}}$$

Lasketaan yhteen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ja säteilyn lämmönsiirtokerroin, josta tuloksena saadaan savukaasun lämmönsiirtymiskerroin. Arinan alapuolella säteily on vallitsevampana, kuten yleensäkin tulipesässä.

$$\alpha_{sk} = 7,795404086 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 9,282946013 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 17,0783501 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### 5.7.2 Vesipuoli

Vesipuolella vesi kiertää pumpun avustuksella eli kyseessä on pakotettu konvektio. Tulo- ja menoputken koko on DN 40, jonka  $d_s = 43,1$  mm. Tuloputken virtausnopeudeksi arvioidaan 0,5 m/s, jolloin tilavuusvirta on 0,7295 dm<sup>3</sup>/s. Tällaisella virtausnopeudella kamiinan vesivaipan vesi vaihtuu kerran kahdessa minuutissa.

Vesivaippapuolella laskennan helpottamiseksi on käytetty vapaan konvektion kaavoja, paitsi ei tulovesiputken kohdalla. Olettaisın, että tällä tavalla päästään kohtuullisen lähelle oikeaa lopputulosta, koska vesipuolen lämmönsiirto on huomattavasti tehokkaampaa savukaasupuoleen verrattuna. Vesipumppu vaihtaa veden kokonaisuudessaan kerran kahdessa minuutissa. Tämä antaa lisävarmuutta siihen, että lämpötilat pysyvät alle kiehumispisteen kaikkialla. Lasketaan Grashofin luku kaavalla 13. Veden tiheydet ja viskositeetit on otettu taulukosta 13. Seinämän lämpötilaksi on arvioitu 90 °C ja veden 40 °C.

$$Gr = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} * 0,2756756765^3 * \frac{992,2 \frac{kg}{m^3} - 965,3 \frac{kg}{m^3}}{965,3 \frac{kg}{m^3}}}{\left(\frac{0,000000326 \frac{m^2}{s} + 0,000000658 \frac{m^2}{s}}{2}\right)^2} = 23660510936$$

Kerrotaan Grashofin luku Prandlin luvulla, jonka jälkeen tiedetään virtauksen tyyppi.

$$Gr * Pr = 23660510936 * 3,57 = 84468024040 > 10^9$$

Edellisestä tuloksen perusteella tiedetään virtausrajakerroksen olevan turbulenti. Lasketaan Nusseltin luku kaavalla 36.

$$Nu \approx 0,14 * \sqrt[3]{84468024040} = 614,26930470$$

Lasketaan veden lämmönsiirtymiskerroin kaavalla 37.

$$\alpha = 614,2693047 * \frac{0,628 \frac{W}{m * K}}{0,2756756765 m} = 1399,329565 \frac{W}{m^2 * K}$$

Keskimääräinen pinta-ala lasketaan kaavalla 5. Aluksi lasketaan ulko- ja sisäpuolen pinta-alat ja tehdään kaavaan sijoittaminen. Pinta-ala laskennassa on käytetty hydraulista läpimittaa ja seinämän vahvuutena 3 mm.

$$A_u = 2 * \pi * \left( \frac{0,275675676 m}{2} + 0,003 m \right) * 0,6 m = 0,53094614 m^2$$

$$A_i = 2 * \pi * \left( \frac{0,275675676 m}{2} \right) * 0,6 m = 0,519636406 m^2$$

$$A_m = \frac{0,53094614 m^2 - 0,519636406 m^2}{\ln \frac{0,53094614 m^2}{0,519636406 m^2}} = 0,525270981 m^2$$

Lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla 4. Lämmönjohtavuuden arvona on käytetty laskennassa materiaalivalmistajan ilmoittamaa +20 °C:n lämpötilassa olevaa lämmönjohtavuutta 15 W/mK. Todellisuudessa tuo arvo on muutaman yksikön isompi pintalämpötilojen ollessa suurempi. Tällä ei ole kuitenkaan käytännössä merkitystä laskun lopputulokseen. Seinämän vahvuus on 3 mm.

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{17,0783501 \frac{W}{m^2 * K}} + \frac{0,53094614 m^2}{15 \frac{W}{m * K}} + \frac{0,003 m}{1399,329565 \frac{W}{m^2 * K}} + \frac{0,519636406 m^2}{1399,329565 \frac{W}{m^2 * K}}} = 17,17655304 \frac{W}{m^2 * K}$$

Lasketaan logaritminen lämpötilaero kaavalla 6. Savukaasun ja seinämän lämpötilaero alussa on 1433 K-363 K = 1070 K. Savukaasun ja seinämän lämpötilaero lopussa 1165 K-363 K = 802 K.

$$\Delta T_m = \frac{1170 \text{ K} - 802 \text{ K}}{\ln \frac{1170 \text{ K}}{802 \text{ K}}} = 929,5700835$$

Lasketaan lämmönsiirtimen ottama teho kaavalla 2.

$$\dot{Q} = 17,17655304 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} * 0,333 \text{ m}^2 * 929,5700835 \text{ K} * 10^{-3} = 5,316947678 \text{ kW}$$

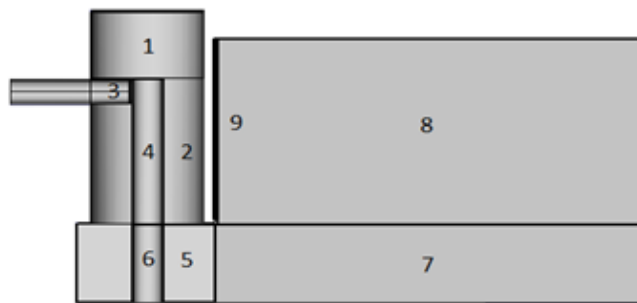
Savukaasuteho lasketaan kaavalla 1. Ominaislämpökapasiteettina on käytetty taulukossa 8 olevaa 1000 °C:n ominaislämpökapasiteettia, jolla saadaan käytännössä melko tarkka vastaus.

$$\dot{Q}_{sk} = 0,014835214 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left( 1,234308034 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 1433 \text{ K} - 1,198067451 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 1165 \text{ K} \right) = 5,355561364 \text{ kW}$$

### 5.7.3 Kokonaislämmönsiirtoteho

Kuvassa 10 on tilaajan alapalokamiinan lämmönsiirrin- ja savukaasutehot ilmakertoimella 2, polttopuun kosteuden ollessa 20 % ja palonopeuden ollessa 5 kiloa tunnissa. Siirtimet 4 ja 6 ovat tulovesiputkea, joka tulee savupiippuun ja paloperän lävitse alavesivaippaan. Näiden savukaasutehot on huomioitu savupiipun ja paloperän ottamaan savukaasutehoon.

|         | [kW]     | [kW]        |
|---------|----------|-------------|
| Siirrin | LS-teho  | SK-teho     |
| 1       | 0,578621 | 0,58312045  |
| 2       | 2,366661 | 2,737122511 |
| 3       | 0,157584 | 0,162062652 |
| 4       | 0,364367 |             |
| 5       | 1,131036 | 1,361363562 |
| 6       | 0,233526 |             |
| 7       | 5,316948 | 5,355561364 |
| 8       | 3,638145 | 3,642504039 |
| 9       | 1,446292 | 1,443453067 |
| YHT:    | 15,23318 | 15,28518765 |



KUVA 10. Kamiinan lämmönsiirtimen tehot

Alapalokamiinan hyötysuhde voidaan laskea, kun tiedetään kamiinan polttoainetehto, hyödynnetty energiamäärä ja häviöenergia. Kamiinan lämmönsiirtimet ovat vesivaipan ympäröiminä ja ulkokuoreen asennetaan lämpöeristekerros. Tässä tilanteessa häviön voidaan ajatella olevan käytännössä savukaasuhäviö.

Lasketaan häviöteho kaavalla 1. Savukaasun lämpötila on viimeisen lämmönsiirtimen loppukohdassa 330 °C ja ulkoilman lämpötila on 20 °C.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{sk} &= 0,014835214 \frac{kg}{s} * \left( 1,0792396 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * 330 ^\circ C - 1,0507 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * 20 ^\circ C \right) \\ &= 4,969931144 kW \end{aligned}$$

Lasketaan hyötysuhde kaavalla 45.

$$\eta = 1 - \frac{4,970 kW}{20,206 kW} = 0,754$$

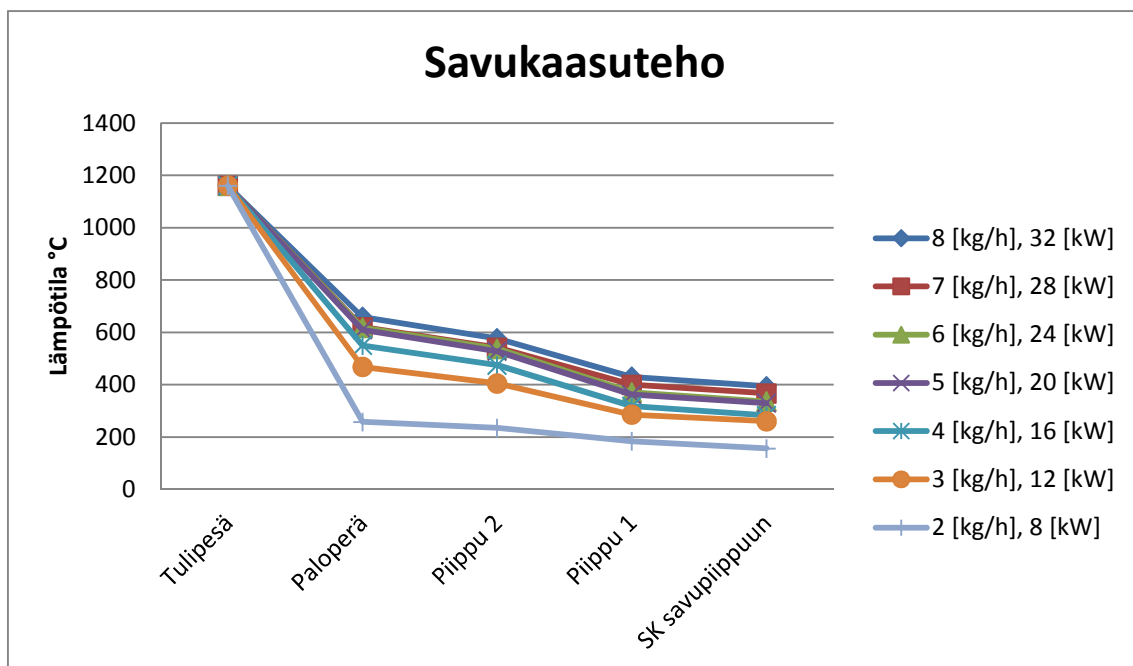
## 5.8 Lämmönsiirtimien suhteellinen tehokkuus

Alapalokamiinan polttoprosessi on panostyyppinen. Tulipesään pinotaan sopiva määrä puita ja sytytetään. Sytytysvaiheen jälkeen palonopeus ja polttoainetehto alkavat kasvamaan. Polttoainetehto saavuttaa tietyn tason, josta se alkaa hiipua

ajan kuluessa, ellei puita lisätä. Polttoainetehon kasvu lisää savukaasun masavirtaa ja savukaasun loppulämpötilat kasvavat hieman.

Työssä on piirretty savukaasutehojen kuvaajia erilaisilla polttoainetehoilla. Kuvaajista voidaan katsoa siirretyksi saadun savukaasutehon suuruus ja suhteellisesti tehokkain lämmönsiirrin. Niistä voi katsoa kamiinan eri kohdissa vallitsevia lämpötiloja lukuun ottamatta tulipesän kohtaa, koska tulipesän yläosan ja takaseinän laskennassa on käytetty pienempiä lämpötiloja.

Kuvan 11 savukaasutehojen kuvaajien polttoainetehot on pyöristetty lähimpään tasalukuun. Laskennassa ei ole huomioitu palamattomien kaasujen aiheuttamia tehohäviöitä, joita aiheutuu lämpötilatasojen mataluudesta, liian pienistä viipymäjoista ja huonoista palokaasujen ilmaseossuhteista. Kuvan kahdessa pienimmässä teholuokassa hyvin todennäköisesti tapahtuu palamattoman polttoaineen häviötä, koska lämpötilakäyrät putoavat paloperään mennessä alle 500 °C:seen.



KUVA 11. Kamiinan savukaasutehon käyrästöt ilmakertoimella 2 ja polttopuun kosteuden ollessa 20 %

Taulukkoon 14 on koottu kamiinan hyötysuhteita erilaisilla polttoainetehoilla. Panospolttoprosessissa palamisnopeus vaihtelee sytytyksen ja täyden palamisen välillä suuresti. Taulukosta voidaan havaita, että hyötysuhde laskevassa suunnassa polttoainetehon kasvaessa. Aivan pienimpiä polttoainetehoja ei ole taulukkoon otettu, koska alhaisten lämpötilatasojen vuoksi voidaan olettaa, että polttoainetta menee palamattomana prosessin lävitse.

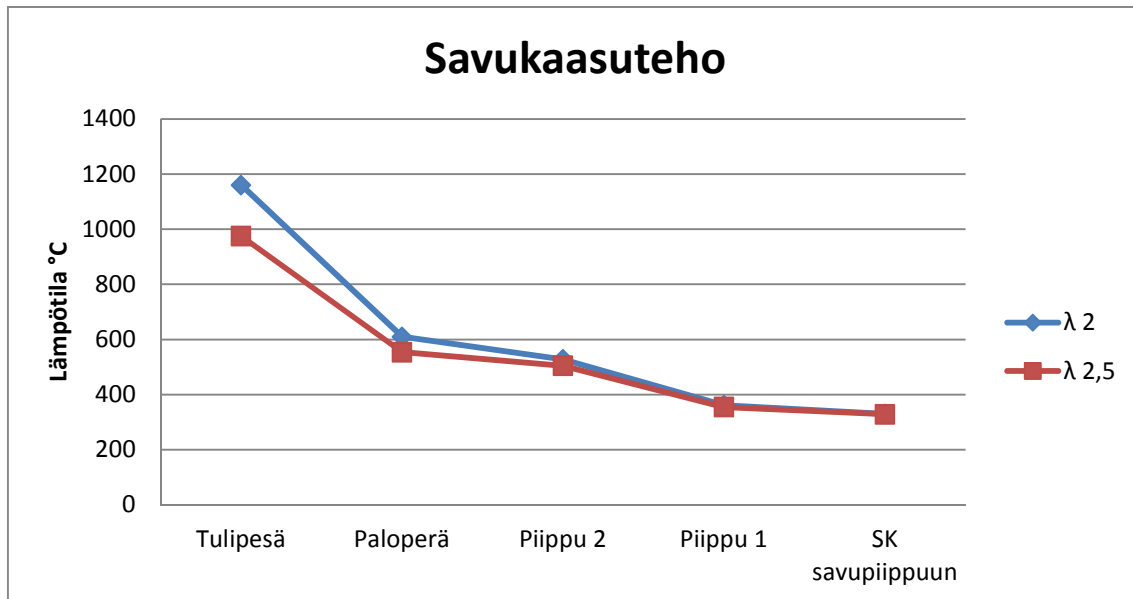
*TAULUKKO 14. Polttoainetehon vaikutus hyötysuhteeseen ilmakertoimella 2 ja polttopuun kosteuden ollessa 20 %*

| Q pa              | $\eta$ |
|-------------------|--------|
| 8 [kg/h], 32 [kW] | 0,703  |
| 7 [kg/h], 28 [kW] | 0,725  |
| 6 [kg/h], 24 [kW] | 0,746  |
| 5 [kg/h], 20 [kW] | 0,754  |
| 4 [kg/h], 16 [kW] | 0,791  |

## 5.9 Ilmakertoimen vaikutus

Kuvassa 12 on havainnollistettu ilmakertoimen vaikutusta palamisprosessiin. Alapalokamiinan ilmakerroin tulee todennäköisesti olemaan 2–2,5 välillä. Arvio perustuu VTT:n julkaisuun (4, s. 37). Kasvanut ilmakerroin alentaa palamislämpötilaa. Kaasujen virtausnopeudet kasvavat ja viipymäajat pienenevät. Lämpötilatason aleneminen aiheuttaa lämpövirran pienentymistä. Tässä tilanteessa ilmakertoimen vaikutus hyötysuhteeseen on noin 5 % ja hyötytehoa menetetään noin 1 kW.

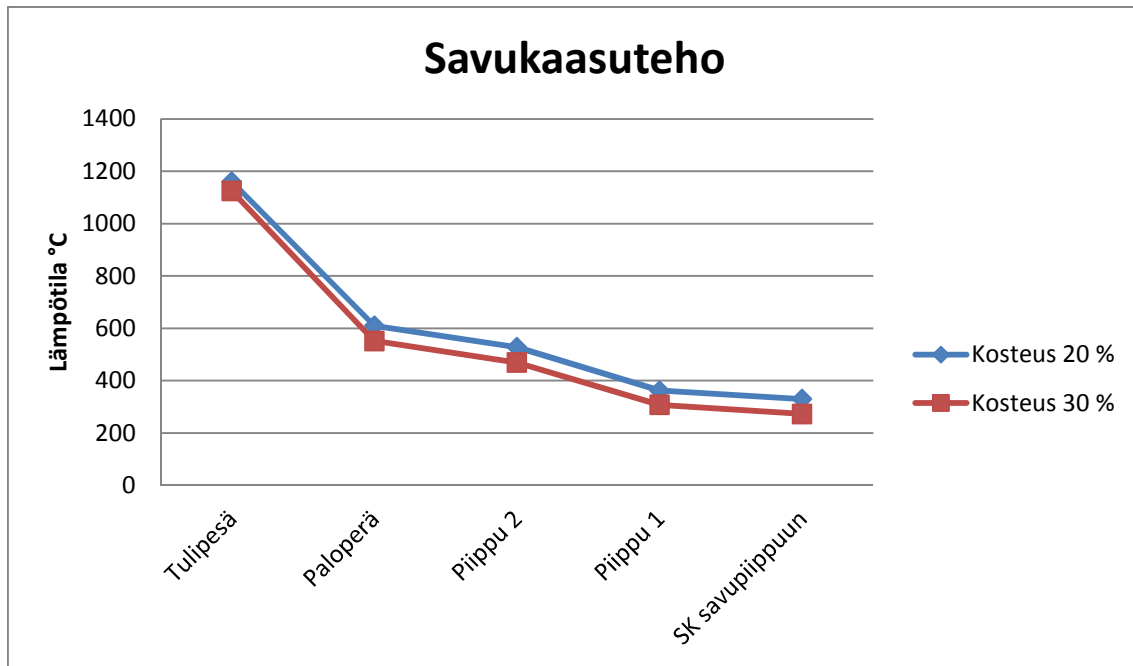




*KUVA 12. Kamiinan savukaasutehon kuvaaja ilmakertoimilla 2 ja 2,5. Polttoaineen kosteus 20 % ja palonopeus 5 kg/h*

#### 5.10 Puun kosteuden vaikutus

Kuvassa 13 näkyy puun kosteuspitoisuuden vaikutus lämpötilatasoihin. Puun kosteuspitoisuus vaikuttaa laskevasti puun lämpöarvoon. Kosteampaa polttoainetta poltettaessa lämpötilat putoavat alemmas ja kulkevat aikalailla samansuuntaisesti. Puun höyrystyessä voimakkaasti on hapen vaikeampaa päästä palavaan polttoaineeseen (3, s. 38). Hyödyksi saatava energia putoaa tässä tilanteessa reilut 1,5 kW ja yli 10 % suhteessa paremmin kuivatettuun polttoaineeseen.



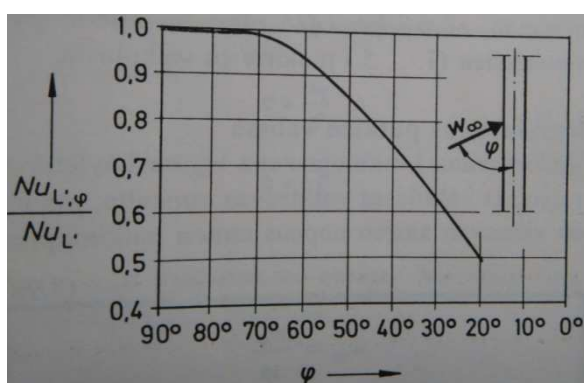
*KUVA 13. Kamiinan savukaasutehon kuvaaja polttoaineen kosteuden ollessa 20 % ja 30 %, ilmakerroin on 2 ja palonopeus 5 kg/h*

## 6 HYÖTYSUHTTEEN PARANTAMINEN

Hyötysuhteen parantamiseksi on tutkittu muutamia helposti toteutettavissa olevaa rakennevaihtoehtoja. Aluksi on pyritty luomaan tilanteeseen sopiva lämmönsiirrin, minkä jälkeen on laskettu siirtimen lämmönsiirtoteho. Lämmönsiirtotehon jälkeen lasketaan kamiinan kokonaislämmönsiirtokyky. Lämmönsiirtimen aiheuttamaa virtausvastusta kannattaa myöskin arvioida, koska kamiinan on suunniteltu olevan alustavasti luonnonvetoinen.

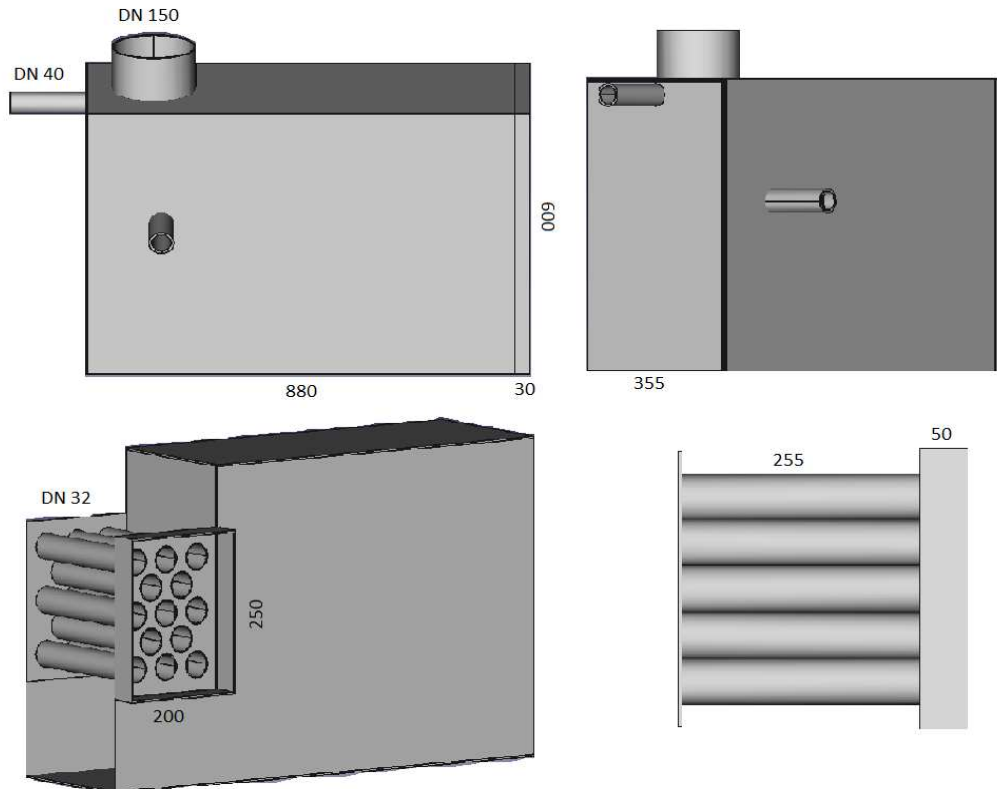
### 6.1 Poikittainen putkipatterimalli

Virtauksen kohdatessa sylinterin vinosti lämmönsiirto pienenee. Kuvassa 14 näkyy, kuinka  $20^\circ$  kohtauskulmassa lämmönsiirto on pienentynyt puoleen lähtötilanteeseen verrattuna. Tämä kuva viittaa siihen, että virtauksessa poikittain oleva putkinippu tai muu rakenne saattaisi olla hyvä vaihtoehto lämmönsiirron tehostamiseen.



KUVA 14. Lämmönsiirron pieneneminen, kun ulkoinen virtaus kohtaa putken vinosti (10, s. 75)

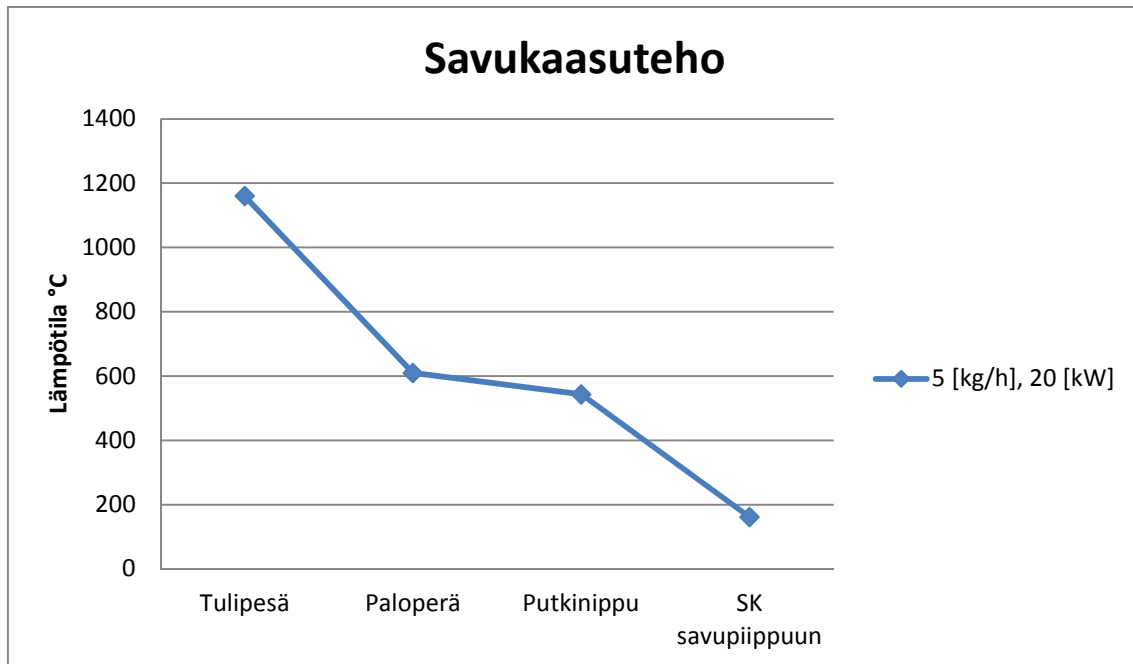
Ensimmäisessä rakennevaihtoehdossa (kuva 15) paloperää korotetaan ja asennetaan lämmönsiirtimeksi limittäinen putkinippu. Putket asennetaan vuoroitellen kolmen ja kahden kappaleen riveihin ja niitä laitetaan viisi päällekkäin. Tulovesiputken sijoituskohtaa muutetaan kamiinan paloperän vieressä olevaan kylkeen, josta vesi virtaa putkipatterin läpi kamiinaan.



*KUVA 15. Rakennevaihtoehto, jossa paloperän päälle sijoitetaan viisirivinen limittäinen putkipaketti*

### 6.1.1 Hyötysuhde ja suhteellinen tehokkuus

Poikittaisessa putkipatterimallissa savukaasut poistuvat piippuun 161 °C:n lämpötilassa, palonopeuden ollessa 5 kg/h ja ilmakertoimen ollessa 2. Kuvassa 16 näkyy limittäisen putkipatterimallisen kamiinan savukaasutehon kuvaaja. Laskennan mukaan patteri näyttäisi ottavan hyvin savukaasutehoa vastaan. Lämmönsiirron hyötysuhteeksi saadaan epäsuoralla menetelmällä (kaava 45) laskettuna 89 %.



KUVA 16. Kamiinan lämpötilatasoja

#### 6.1.2 Vetoisuuden arviointi

Lasketaan aluksi kuumien savukaasujen aiheuttama noste kaavaa 46 soveltaen.

$$\Delta p_1 = \left( 1,29 \frac{m^3}{kg} - 1,292 \frac{m^3}{kg} * \frac{273 K}{273 K + 161 ^\circ C} \right) * 9,81 \frac{m}{s^2} * 2m = 9,364224964 Pa$$

Lasketaan Reynoldsin luku kaavalla 7. Savukaasun virtausnopeus on 0,88 m/s, piipun sisähalkaisija 160,3 mm ja savukaasun kinemaattinen viskositeetti  $3,52887 * 10^{-6}$ .

$$Re = \frac{0,883 \frac{m}{s} * 0,1603m}{3,52887 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 40121$$

Lasketaan piipun vastuskerroin käyttämällä Blasiuksen kaavaa 47.

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{40121}} = 0,022355938$$

Lasketaan virtausvastus kaavaa 46 soveltaen.

$$\Delta p_2 = \frac{1}{2} * 1,292 \frac{m^3}{kg} * \frac{273 K}{273 K + 161 ^\circ C} * (0,88 \frac{m}{s})^2 * 0,022355938 * \frac{2 m}{0,1603 m}$$

$$= 0,068436184 Pa$$

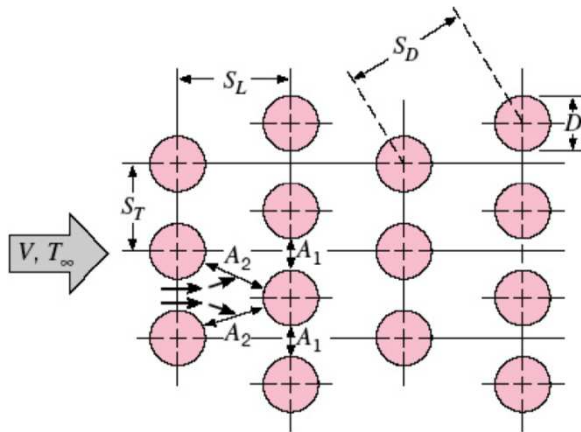
Lasketaan kertavastus, joka aiheutuu savukaasujen mennessä savupiippuun kaavalla 50. Tilanteeseen sopiva kertavastuskerroin on ( $\zeta=0,5$ ) (18).

$$\Delta p_\zeta = 0,5 * \frac{1}{2} * 0,945631826 \frac{kg}{m^3} * (0,987637374 \frac{m}{s})^2 = 0,181846444 Pa$$

Lasketaan ulosvirtaushäviö kaavaa 46 soveltaen.

$$\Delta p_3 = \frac{1}{2} * 1,292 \frac{m^3}{kg} * \frac{273 K}{273 K + 161 ^\circ C} * (0,88 \frac{m}{s})^2 = 0,245355844 Pa$$

Lasketaan putkinipun aiheuttama painehäviö. Putken ulkohalkaisija 42,4 mm, putkiväli poikittain 18,2 mm ja pitkittäisessä linjassa 10 mm. Kuvassa 17 näkyy limittäisen putkipatterin laskennassa tarvittavia suureita.

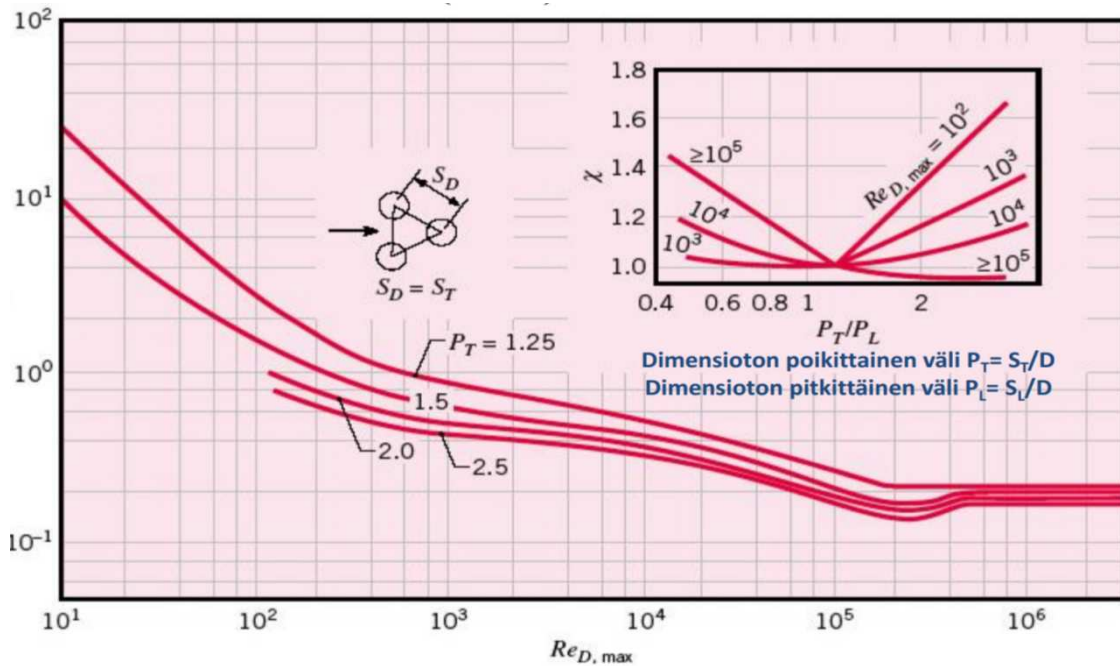


KUVA 17. Limittäinen putkijako (16, s. 6)

$$S_L = 42,4 mm + 10 mm = 52,4 mm$$

$$S_T = 42,4 mm + 18,2 mm = 60,6 mm$$

Kuvasta 18 luetaan limittäisen putkipatterin kitkakerroin  $x$  ja korjauskerroin  $f$ . Putkinipun Reynoldsin luvun arvoksi on saatu 8503. Dimensioton poikittainen väli on  $P_L=(52,4/42,4)= 1,236$ . Dimensioton pitkittäinen väli on  $P_T=(60,6/42,4)= 1,429$ .  $P_T/P_L=(1,429/1,236)=1,156$ . Taulukosta luetaan kitkakertoimeksi 1 ja korjauskertoimen arvoksi 0,6.



KUVA 18. Limittäiselle putkijärjestykselle kitkakerroin  $x$  ja korjauskerroin  $f$  (16, s.8)

Lasketaan savukaasun maksimivirtausnopeus kaavalla 49.

$$V_{max} = \frac{0,0606 \text{ m}}{0,0606 \text{ m} - 0,0424 \text{ m}} * 0,473453953 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1,576445581 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Lasketaan putkinipun aiheuttama painehäviö kaavalla 48. Kuvasta 14 luetaan kitkakertoimesi 0,6 ja korjauskertoimeksi 1.

$$\Delta p_{nipun \text{ painehäviö}} = 5 * 1 * \left( \frac{0,615568361 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (1,576445581 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} \right) * 0,6$$

$$= 2,294697889 \text{ Pa}$$

Lasketaan putkinipun välillä oleva vetoisuus kaavaa 46 soveltaen. Putkien väli pitkittäissuunnassa 10 mm. Putkinipun korkeus viisrivisenä on 252 mm.

$$\Delta p_{1\text{ nippu}} = \left( 1,292 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} * \frac{273 \text{ K}}{273 \text{ K} + 161 \text{ }^\circ\text{C}} - 1,292 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} * \frac{273 \text{ K}}{273 \text{ K} + 543 \text{ }^\circ\text{C}} \right) * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ * 0,252 \text{ m} = 0,940554433 \text{ Pa}$$

Lasketaan nipun ulosvirtaushäviö soveltaen kaavaa 46.

$$\Delta p_{3\text{ nippu}} = \frac{1}{2} * 1,292 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} * \frac{273 \text{ K}}{273 \text{ K} + 161 \text{ }^\circ\text{C}} * \left( 1,58 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0,88 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 0,151137448 \text{ Pa}$$

Lasketaan putkinipun välille jäävä todellinen häviö.

$$\Delta p_{\text{putkinippu}} = (0,940554433 - 2,294697889 - 0,151137448) \text{ Pa} \\ = -1,505280904 \text{ Pa}$$

Lasketaan piipun veto vähentämällä häviöitä piipun nosteesta.

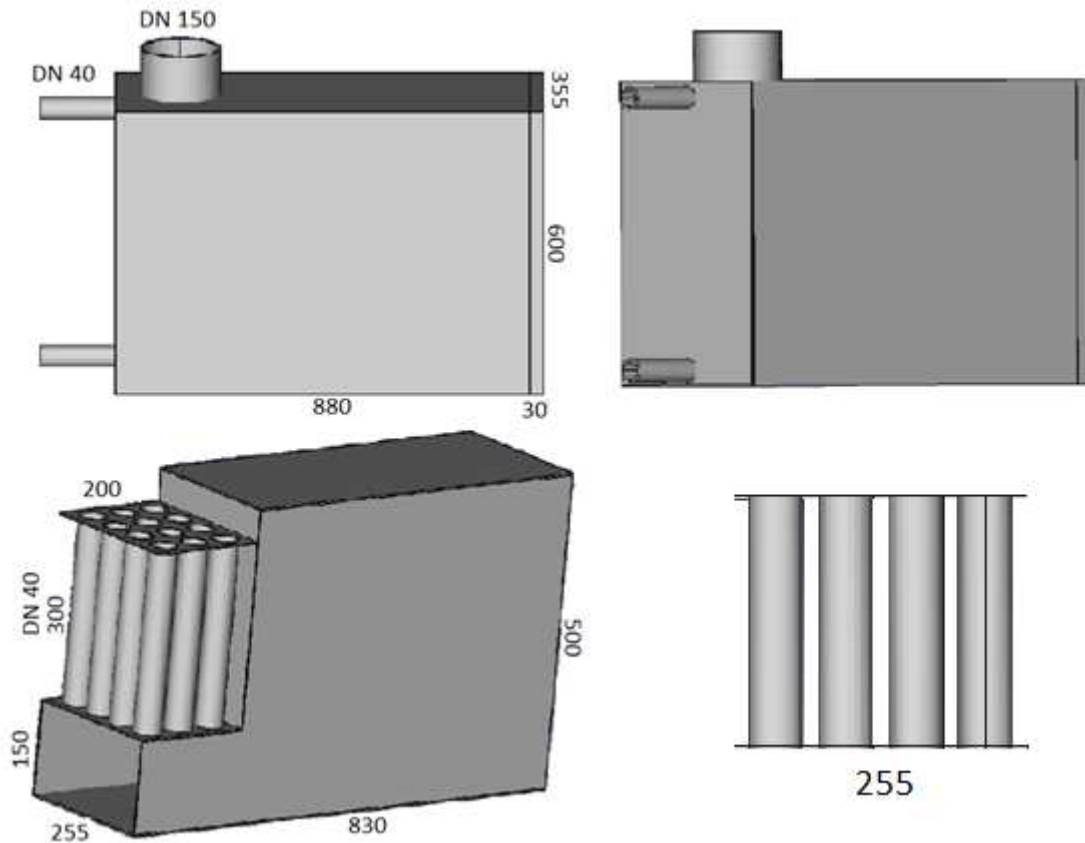
$$\Delta p = \Delta p_1 - \Delta p_2 - \Delta p_3 - \Delta p_{\text{putkinippu}} - \Delta p_\zeta = (9,364224964 - 0,068436184 - \\ 0,245355844 - 1,505280904 - 0,181846444) \text{ Pa} = 7,343321052 \text{ Pa}$$

Savukaasujen noste riittää tässä tilanteessa kattamaan tämän laskennan häviöt. Häviöt on laskettu savupiipusta putkipatterille saakka. Tulipesän ja tulipesäluukun häviöitä ei ole tässä laskettu. Niiden kattamiseen on jäljellä edellä laskettu paine-eron määrä.

## 6.2 Pystymallinen putkipatteri

Kuvassa 19 on pystyputkimallinen rakennevaihtoehto. Paloperän päälle asennetaan 12 kappaleen DN 40 kokoisista putkista valmistettu putkipaketti, jonka läpi savukaasut virtaavat eteenpäin. Laskennassa on huomioitu putkien päälle tuleva savupiipun yhdysrakenne 50 mm korkeana savukaasukotelona, jonka kautta savukaasut virtaisivat piippuun.

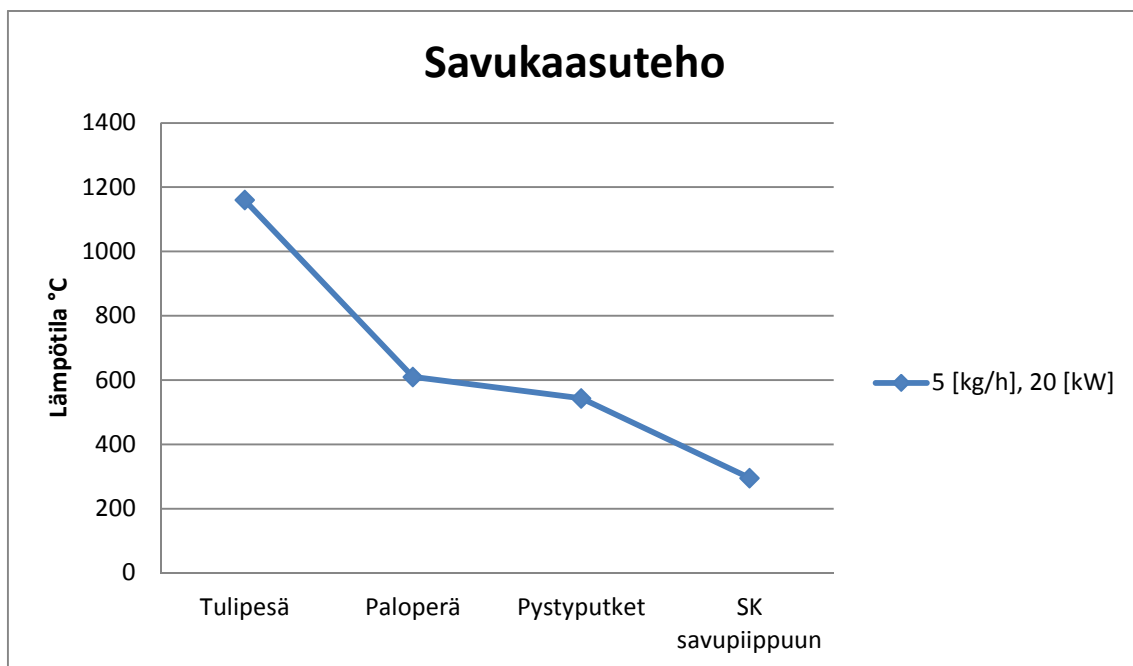




KUVA 19. Rakennevaihtoehto, jossa paloperän päälle pystyputkimallinen lämmönsiirrin

### 6.2.1 Hyötysuhde ja suhteellinen tehokkuus

Kuvassa 20 on pystyputkinipulla varustetun kamiinan savukaasutehon kuvaaja. Savukaasuteho laskee lämmönsiirtimien läpi virratessaan ja on lopulta laskennallisesti tarkasteltuna 295 °C virratessaan savupiippuun. Laskennan ilmakerroimen arvo on 2 ja puun kosteus 20 %. Kaavalla 45 on saatu hyötysuhteen arvoksi 78 %.



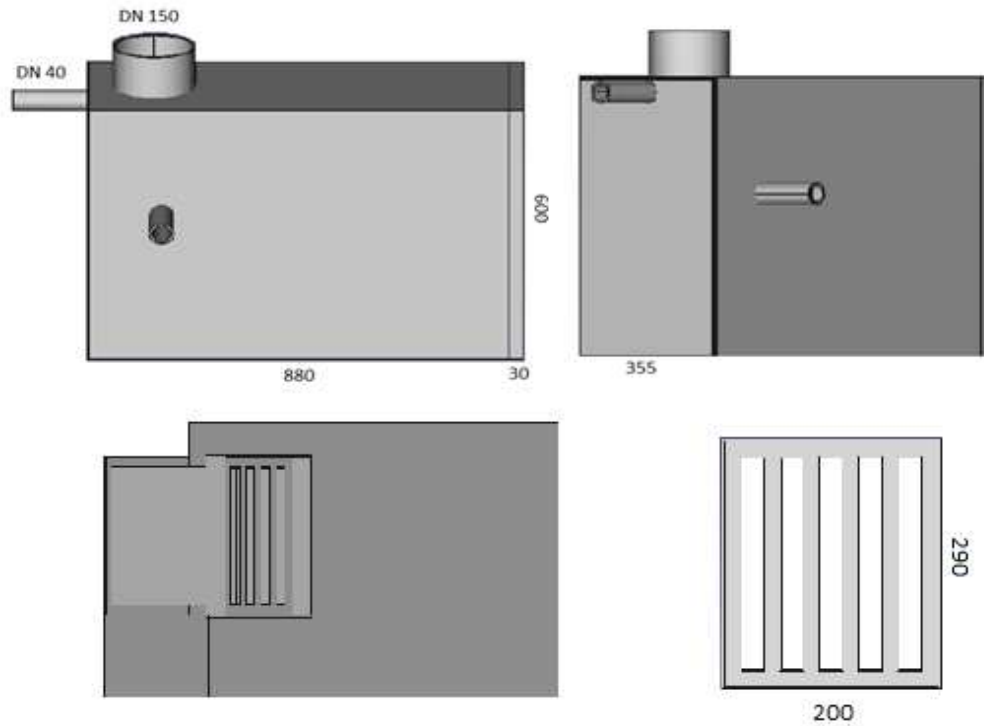
KUVA 20. Pystyputkimallisen kamiinan lämmönsiirtoteho

### 6.2.2 Vetoisuuden arviointi

Pystyputkimallisen alapalokamiinan vetoisuus on laskettu samoilla periaatteilla kuin edellisessä kappaleessa esitellyn poikittaisen putkipakettimallin. Pystyssä oleva putkinippu on laskettu samalla periaatteella savupiipun kanssa. Tässä mallissa poistuvien savukaasujen lämpötila on korkeampi ja savupiippuun saadaan parempi veto. Nettotuloksena on saatu pystyputkimalliselle paloperään asti laskettaessa 12,2 pascalin alipaine.

### 6.3 Levylämmönsiirrin

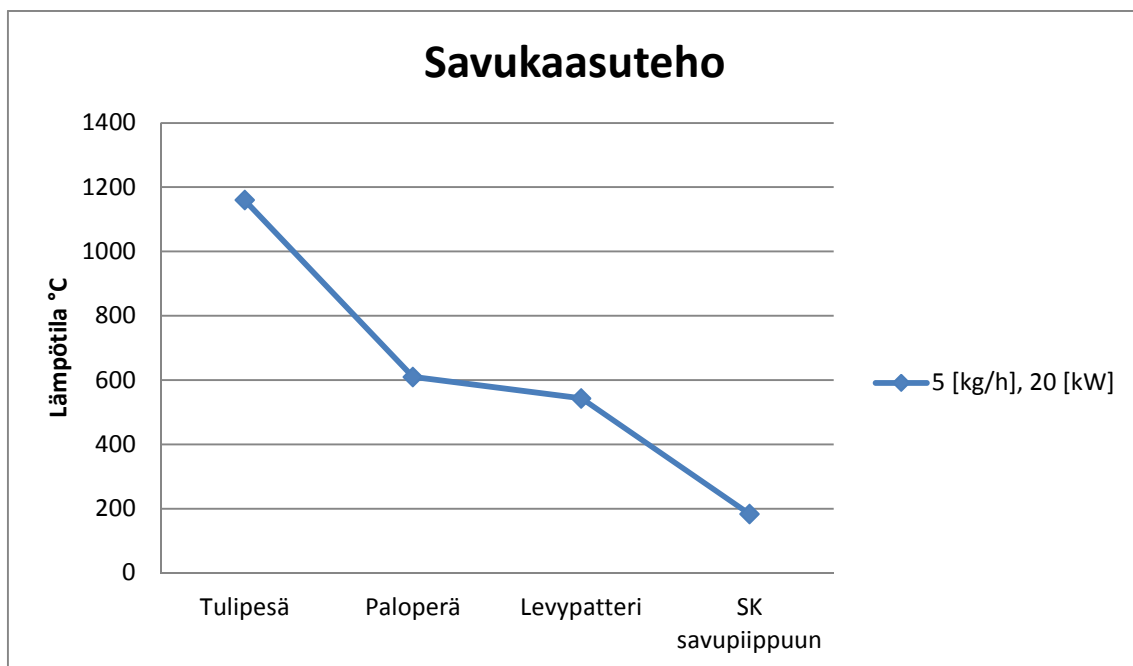
Kolmannessa rakennevaihtoehdossa kamiinan paloperän päälle asennetaan kuvan 21 savukaasuvirtauksessa poikittain oleva levylämmönsiirrinpaketti. Tulovesi ohjattaisiin patterin reunassa olevan kehikon (200\*290) kautta patterin lävitse, viiden levykanavan (16,7\*250) kautta.



*KUVA 21. Rakennevaihtoehto, jossa paloperän päällä levylämmönsiirrin*

### 6.3.1 Hyötysuhde ja suhteellinen tehokkuus

Kuvassa 22 on levylämmönsiirrinmallin savukaasutehon kuvaaja. Ilmakertoime-  
na on 2 ja polttoaineen kosteus on 20 %. Savukaasut poistuvat 183 °C lämpöti-  
lassa. Levylämmönsiirrinmallin kokonaishyötysuhteeksi on saatu 87 % (kaava  
45).



KUVA 22. Levylämmönsiirtimellä varustetun kamiinan savukaasuteho

### 6.3.2 Vetoisuuden arviointi

Levylämmönsiirrin mallisen alapalokamiinan vetoisuus on laskettu samalla periaatteella ensimmäisen virtauksessa poikittain olevat putkipatterimallin kanssa. Levylämmönsiirtimessä oleville suorakaiteen muotoisille virtauskanaville on laskettu hydraulinen halkaisija, jonka jälkeen siihen sovellettu samoja laskenta vaiheita pystyputkimallin kanssa. Nettovetoisuus on laskettu paloperään saakka ja tuloksena on 8,1 pascalin alipaine.

## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin kylpytynnyreiden ja uima-altaiden lämmitykseen suunniteltua alapalokamiinaa. Pää tavoitteena oli laskea tilaajan piirtämän alapalokamiinan termodynamiikka läpi, selvittää sen hyötysuhde ja hyötysuhteen kannalta rakenteellisesti merkittävimmät kohdat. Lisäksi tuli esittää helposti toteutettavissa olevia hyötysuhdetta parantavia rakenneratkaisuja. Toisena tavoitteena oli tutustua avoimen lähdekoodin piirustusohjelmien käyttöön. Työssä päästiin alussa asetettuihin tavoitteisiin.

Aluksi ratkaistiin tilaajan alapalokamiinan hyötysuhde. Laskennassa jouduttiin tekemään arviointia ja oletuksia ilmakertoimen, polttoaineen kosteuspitoisuuden ja palamisnopeuden arvoihin. Arvioinnin ja olettamuksien pohjaksi hyödynnettiin teorian tietoja luotettavista lähteistä.

Kamiinan polttoaine palaa panospolttotyypisesti luonnonvedolla, mikä aiheuttaa polttoainetehovaihtelua. Laskentaa laajennettiin kuvaamaan koko polttoainetehoa. Samalla tutkittiin polttoaineen kosteuden ja ilmakertoimen vaihtelua niiden mahdollisissa vaihteluväleissään. Laskennan tuloksista piirrettiin savukaasutehon kuvaajat, joita vertailemalla saadaan tietoa lähtöarvojen aiheuttamista muutoksista lämmönsiirtotehokkuuteen, hyötysuhteeseen ja lämmönsiirtimien tehokkuuksista. Tulipesä oli kamiinojen lämmönsiirtimistä tehokkain.

Lopuksi tutkittiin rakenteita, joilla voitaisiin parantaa hyötysuhdetta. Rakenteet piirrettiin avoimen lähdekoodin ohjelmalla ja laskettiin kokonaishyötysuhteet. Vaakaputkimallinen kamiina oli hyötysuhteeltaan paras. Samalla arvioitiin uusien rakenteiden vetoisuutta. Laskenta suoritettiin paloperään saakka. Pystyputkimallinen kamiina on uusista malleista vetoisin.

Työ antaa hyvän pohjan laadukkaaseen, kustannustehokkaan ja hyvällä hyötysuhteella toimivan alapalokamiinan kehitystyölle. Jatkokehitystyössä voitaisiin esimerkiksi valmistaa kiinnostavin malli, jota testattaisiin ja tutkittaisiin käytännössä. Pääaiheina voisi tarkastella palamisprosessia ja lämmönsiirtoa. Mittaustu-

lostien perusteella näkisi, kuinka hyvin laskenta on onnistunut ja pitääkö laskennan tietyillä osa-alueilla tehdä korjausliikkeitä, jotta laskenta antaisi tarkemman tuloksen jatkokehittävälle mallille. Palamisprosessin tarkastelussa tutkittaisiin, palaako polttoaine riittävän täydellisesti ja tehokkaasti. Koepoltosta saadun tutkimustiedon pohjalta voitaisiin tehdä tarvittaessa muutoksia lämpötiloihin, viipymäaikoihin, vetoisuuteen ja palamisilman syöttöön.

## LÄHTEET

1. Esittely. 2014. Oulun Eteläinen instituutti. Saatavissa:  
<http://www oulu.fi/oei/node/15658>. Hakupäivä 27.10.2014.
2. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka 5., uudistettu painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
3. Wahlroos, Lasse 1979. Kotimaiset polttoaineet ja keskuslämmityskattilat. Pori: Energiakirjat.
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 31.10.2014.
5. Marttila, Seppo 2012. T350106 Tekninen Termodynamiikka 6 op. Opintojakson oppimateriaali vuonna 2012. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
6. Alakangas, Eija 1992. Taloustulisijojen käyttö. Helsinki: Rakennustieto.
7. Pietilä, Kai 2005. Puun panospolton identifiointi ja säätö tulisijassa. Diplomityö. Oulu. Oulun yliopisto, prosessitekniikan osasto.
8. Alapalokamiinan suunnittelukuva.10.10.2014. Laatija Oulun yliopiston Oulun Eteläisen instituutti Tulevaisuuden tuotantoteknologiat- tutkimusryhmä.
9. Mäkelä, Veli-Matti 2012. T630303 Lämmönsiirtotekniikka 3 op. Opintojakson oppimateriaali keväällä 2012. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
10. Wagner, Walter 1994. Lämmönsiirto. Helsinki: Painatuskeskus Oy.
11. Esala, Jussi. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Lämpö ja lämmön siirtyminen. Saatavissa:

<http://www.energiaakatemia.fi/attachments/article/56/05%20Lampo%20ja%20Olammon%20siirtyminen.pdf>. Hakupäivä 21.11.2014.

12. Kakko, Markku 2012. Lämminvesikattilan lämpötekniinen suunnittelu. Opin- näytetyö. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma.
13. Wuori, Paul A 1994. Virtausmekaniikan perusteet. 4., täydennetty ja korjattu painos. Helsinki: Hakapaino Oy.
14. Incropera, Frank P – DeWitt, David P 1990. Fundamentals of heat and mass transfer. 3., uudistettu painos. New York: John Wiley & Sons.
15. Gas Viscosity Calculator. 2003–2013. Kaasujen viskositeetilaskin. Athens, Ohio: LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd. Saatavissa: <http://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.php>. Hakupäivä 22.10.2014.
16. BH20A0300 Lämmönsiirron perusteet, 3 op. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa: file:///C:/Users/Admin/Downloads/luento\_5%20(4).pdf. Hakupäivä 28.8.2015.
17. Mäkelä, Veli-Matti 2011. T630203 Virtaustekniikka 3 op. Opintojakson oppimateriaali syksyllä 2011. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.