

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

Olli-Matti Heiskanen

PUUPELLETIN POLTTOLAITTEEN KEHITTÄMINEN VARAAVAAN  
TULISIJAAN

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2021



**Karelia**  
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ  
Joulukuu 2021  
Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

Tekijä  
Olli-Matti Heiskanen

Nimeke  
Puupelletin polttolaitteen kehittäminen varaavaan tulisijaan

#### Tiivistelmä

Tulisijoja käytetään Suomessa edelleen paljon ja myös tulevaisuudessa asuinrakennusten tärkeänä lämpöenergian lähteenä. Käytössä pelkästään Suomessa on yli kaksi miljoonaa vanhaa tulisijaa, jotka tuottavat merkittävän määrän pienhiukkasia ympäröivään ilmaan. Polttoaineena käytettävät puut ja polttomenetelmä eivät mahdollista puhtaampaa palamista vanhoissa tulisijoissa.

Tässä opinnäytetyössä kehitettiin vanhaan tulisijaan sijoitettavaa laitetta, jonka avulla voidaan polttaa polttopuita vähemmän pienhiukkasia palaessa tuottavaa puupellettiä. Opinnäytetyöprosessin aikana suunniteltiin ja valmistettiin useita eri versioita testattavista laitteista.

Koepolttojen yhteydessä ja laitteiden suunnittelun tueksi tulisijan toiminnasta kerättiin lämpötila- ja savukaasudataa eri mittalaitteilla. Kerättyjä lämpötila- ja savukaasumittausten tuloksia analysoitiin ja havaittiin valmistettujen polttolaitteiden lämmitystehon vastaavan polttopuiden käyttöä.

Lopuksi pohdittiin mahdollisia parannuksia laitteiden jatkokehitystä ja toiminnan tehostamista varten.

Kieli  
suomi

Sivuja 35  
Liitteet 2  
Liitesivumäärä 6

Asiasanat  
pelletit, polttopuu, savukaasut, tulisijat



THESIS  
December 2021  
Degree Programme in Energy and Environmental  
Engineering

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600

Author (s)  
Olli-Matti Heiskanen

Title  
Designing device for burning wood pellets in a heat storing fireplace

#### Abstract

Fireplaces are still widely used in Finland and will continue to be an important source of thermal energy in residential buildings. There are more than two million old fireplaces in use in Finland alone, which produce a significant number of small particles in the surrounding air. The firewood used as fuel and the method of burning do not allow cleaner combustion in old fireplaces.

In this thesis, devices which can be used to burn wood pellets were developed to be placed in an old fireplace, During the thesis process, several different versions of the devices to be tested were designed and manufactured.

In connection with the test burns and to support the design of the equipment, temperature and flue gas data were collected from the operation of the fireplace with various measuring devices. The collected results of temperature and flue gas measurements were analyzed, and it was found that the heating power of the manufactured combustion devices corresponded to the use of firewood.

Finally, possible improvements were considered for further development of the equipment and more efficient operation.

Language  
Finnish

Pages 35  
Appendices 2  
Pages of Appendices 6

Keywords  
pellets, firewood, flue gases, hearths

## Sisältö

Johdanto .....	6
1 Tulisijat rakennuksen lämmönlähteenä .....	7
1.1 Palaminen tulisijassa .....	7
1.2 Tulisijatyytit .....	8
1.3 Käytettävät polttoaineet .....	10
2 Koejärjestely .....	11
2.1 Koejärjestelyn tavoitteet .....	11
2.2 Paloturvallisuus .....	12
2.3 Koejärjestely .....	12
2.3.1 Lämpötila .....	13
2.3.2 Savukaasu .....	15
2.4 Koepoltto .....	16
3 Polttolaite .....	16
3.1 Suunnittelu .....	16
3.2 Toteutus .....	18
3.3 Polttolaitteen rakenne .....	19
3.3.1 Versio P .....	21
3.3.2 Versio W .....	23
4 Tulokset .....	25
4.1 Palamisaika .....	25
4.2 Lämpötila .....	26
4.3 Savukaasu .....	26
5 Pohdinta .....	27
Lähteet .....	29

### Liitteet

Liite 1

Liite 2

## Sanasto

CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi.
CO	Hiilimonoksidi (häkä).
O <sub>2</sub>	Happi.
kW	Kilowatti.
kWh	Kilowattitunti.
m	Massa.
Q	Lämpöarvo.
$\lambda$	Ilmakerroin (lambda).
P	Teho.
$\rho$	Tiheys.
V	Tilavuus.
h	Tunti.
t 50 %	Se aika puupanoksen polton alusta, jolloin tulisijan tilaan luovuttama lämmitysteho on puolet maksimista (h).
t 100 %	Se aika puupanoksen polton alusta, jolloin tulisijan tilaan luovuttama lämmitysteho on suurimmillaan (h).

## Johdanto

Erilaisten puuta lämpöenergian lähteenä käyttävien tulisijojen käyttö pientalojen lämmittämiseen primääri- ja sekundäärilämmönlähteenä on yleistä kaupunkien pientaloalueilla ja maaseudun haja-asutusalueilla. Tulisijat toimivat ilman sähköä, joten niiden käytöllä on mahdollista pienentää pakkashuippujen sähköenergian kulutusta (TSY 2017). Puunpolton aiheuttamat pienhiukkaset synnyttävät keskustelua ja negatiivista asennoitumista tulisijojen käyttöä kohtaan. Tois- taiseksi puu kuitenkin määritellään uusiutuvaksi energiaksi ja metsäisessä Suomessa polttoainetta kasvaa runsaasti, joten tulisijoja kehitetään edelleen energiatehokkaammiksi ja vähemmän päästöjä tuottaviksi.

Suomessa poltetaan puita yli 2 miljoonassa tulisijassa vuosittain rakennuksen lämmittämiseksi (TSY 2017). Käytössä olevat tulisijat ovat keskimäärin melko iäkkäitä, joten polttoaineen palaminen ja tulisijan energiatehokkuus voivat olla heikkoja. Saunankiukaat ja muut tulisijat yhteenlaskettuna Suomessa hankitaan noin 70 000 uutta tulisijaa vuosittain (VTT 2008). VTT:n 2008 julkaiseman tutkimuksen mukaan Suomessa lähes 95 %:iin uusista asuinrakennuksista asennettiin tulisija pää- tai varalämmönlähteeksi.

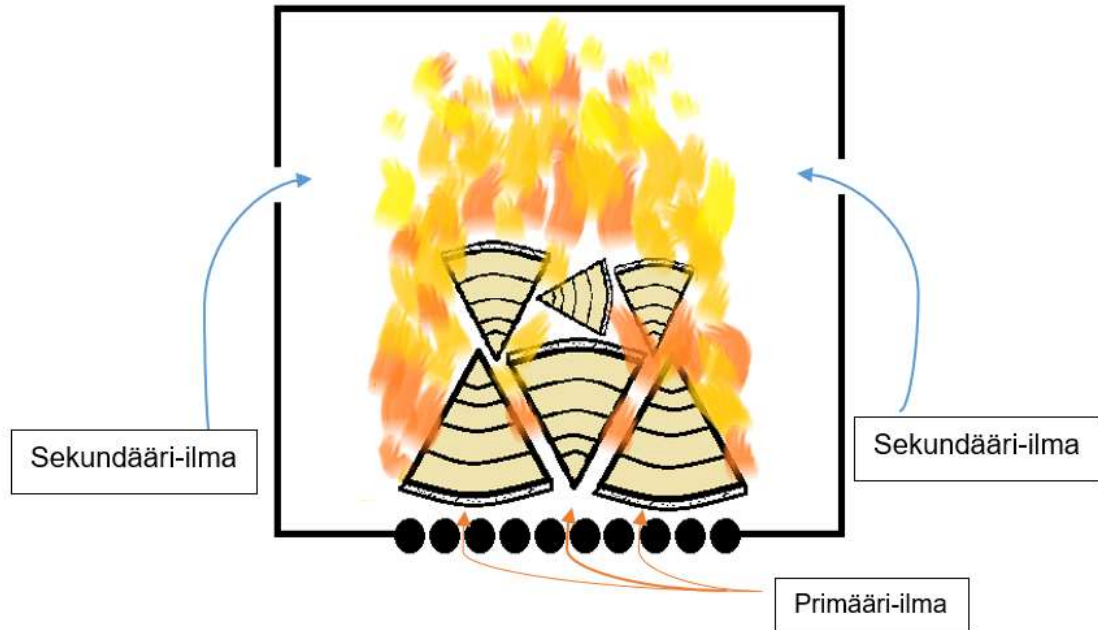
Puun pienpoltossa syntyvät pienhiukkaspäästöt ovat nousseet merkittävimiksi hiukkaspäästöjen lähteeksi 2000-luvun aikana (YM 2019). Takkavalmistajien on noudatettava EU:n direktiiviä päästökattodirektiiviä 2016/2284 pienhiukkaspäästöistä ja se astuu voimaan vuonna 2022 (YLE 2021). Palamisen optimoinnilla saavutetaan huomattava pienhiukkas- ja nokipäästöjen laskua. Tulisijojen palotapahtuman kehittäminen parantaa myös niiden hyötysuhdetta, jonka tulisi uusissa tulisijoissa olla vähintään 80 %. Hyötysuhteen paraneminen luonnollisesti vähentää myös polttoaineen tarvetta. Pienhiukkasten muodostumiseen vaikuttaa olennaisesti myös poltettavan polttoaineen ominaisuudet. Kotimainen puupelletti on yksi vaihtoehtoinen polttopuut korvaava polttoaine pienhiukkasten vähentämiseksi. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ja verrataan vanhan tulisijan toimintaa polttopuilla ja puupelletillä käyttämällä erityyppisiä puupelletin polttoon kehitettyjä laitteita.

# 1 Tulisijat rakennuksen lämmönlähteenä

## 1.1 Palaminen tulisijassa

Palamisella tarkoitetaan aineen kemiallista yhtymistä happeen. Reaktio tapahtuu vaiheittain, jotka ovat alkulämpeneminen 100°C:een, veden haihtuminen, pyrolyysi ja pyrolyysikaasujen palaminen, sekä jäännöshiilen palaminen (Alakangas 2008). Palaminen määrittyy polttoaineen laadun perusteella sekä ympäröivillä olosuhteilla. Puu koostuu vedestä, kuiva-aineista (75–83 %), hiilestä (15–21 %) ja tuhkasta (0,3–4,0 %) (Alakangas 2000). Kuiva-aineilla tarkoitetaan alkuaineyhdisteitä, jotka pyrolysoituvat eli kaasuuntuvat ja palavat eri lämpötiloissa 150 °C-asteesta alkaen 800 °C-asteeseen saakka. Voimakkainta pyrolysoituminen on lämpötilavälillä 250–400°C. Kaasujen syttyminen vaatii oikean määrän happea ja riittävän korkean, puun kosteudesta riippuen, noin 200–300 °C-asteen lämpötilan. Kaasujen palaminen on palamisen nopein vaihe, minkä jälkeen jäännöshiili palaa jättäen polttoaineesta jäljelle tuhkaa.

Palamisen laatua säädetään tulipesään ohjattavan ilman määrää muuttamalla. Primääri- eli ensiöilma ohjataan tulipesässä tapahtuvaan palotapahtumaan alakautta. Jotta kaasut saataisiin palamaan tarkemmin ja täydellisemmin loppuun, noki- ja muiden hiukkaspäästöjen vähentämiseksi sekä palamisen tehon maksimoimiseksi, palotapahtuman yläosaan ohjataan sekundääri- eli toisioilmaa (kuva 1). Ilman sekoittuminen palaviin kaasuihin tehokkaasti oikeassa suhteessa ja lämpötilassa on tärkeää palamisen optimoimiseksi.



Kuva 1. Paloilman syöttö tulipesään (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

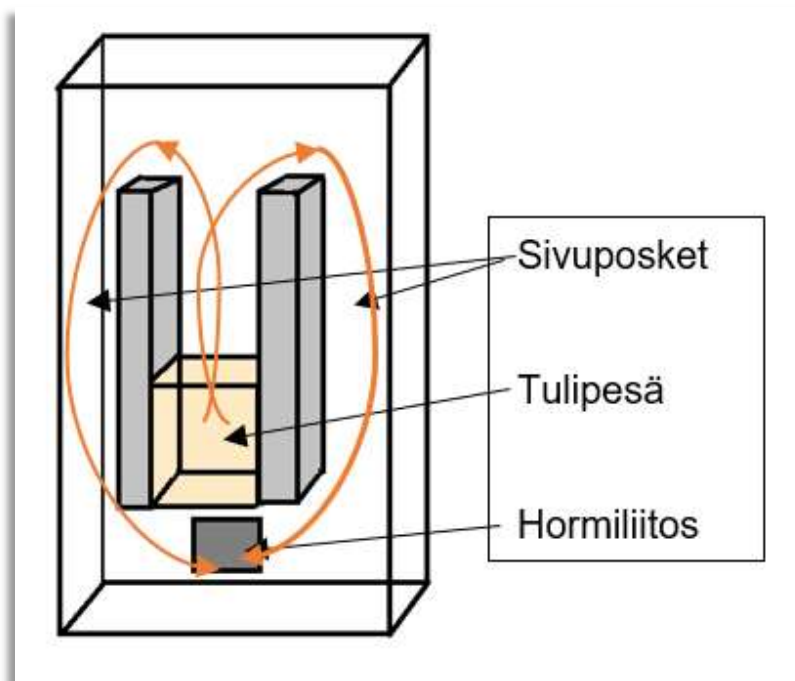
Luukullisten tulisijojen optimaalinen ilmakerroin kuuluisi olla 2–2,5 (Harvia 2021). Ilmakertoimella ( $\lambda$ ) tarkoitetaan palamisessa tarvittavan teoreettisen ja todellisen ilmamäärän suhdetta. Teoreettinen ilmamäärä voidaan laskea reaktioyhtälöä apuna käyttäen ja todellinen ilmamäärä saadaan mittaamalla. Liiallinen palamisilma jäädyttää tulipesää ja voi heikentää olennaisesti palamisen laatua. Liian vähäinen palamisilman määrä aiheuttaa epätäydellistä palamista ja synnyttää häkää (CO), jolloin myös palamisen lämmöntuotto heikkenee.

## 1.2 Tulisijatyyppit

Rakennusten lämmittämiseen käytettävät tulisijat voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan, lämpöä massaansa varaaviin tulisijoihin ja ei-varaaviin tulisijoihin eli kamiinoiniin. Varaavat tulisijat ovat tyypillisesti kivistä tai tiilistä muurattuja kiinteitä rakenteita. Kamiinat taas ovat useimmiten metallista valmistettuja kompakteja tulisijoja. Tulisija on varaava tai ei-varaava standardin SFS-EN 15250 -mukaisesti riippuen tulisijan pinnan jäähtymisnopeudesta. Jos tulisijan pinnan ja ympäristön lämpötilan erotuksen jäähtyminen hetkestä t100 % hetkeen t50 % kestää vähintään neljä tuntia, on tulisija varaava (VTT 2008). Jos lämpötilan puolittuminen tapahtuu alle neljässä tunnissa, tulisija ei ole varaava.



Yleisesti vanhat tulisijat koostuvat yksinkertaisesta kuvassa 2. esitetystä rakenteesta, jossa kuuma savukaasu ohjataan tulipesästä tulisijan yläosan kautta sivuposkia vastavirtausperiaatteella alas ja edelleen savuhormiin tulisijan alareunan hormiliitoksen kautta. Tätä polttomenetelmää kutsutaan yläpaloksi, koska polttoaineesta pyrolysoituneet kaasut palavat polttoaineen yläpuolella. Yläpalossa koko polttoainepanos palaa kerralla, joten primääri- ja sekundääri-ilmojen tarve ja palon ilmakerroin muuttuu palon eri vaiheiden mukaisesti. Ilmakertoimen jatkuva muutos huonontaa palamisen hyötysuhdetta ja lisää aiheutuvia päästöjä.



Kuva 2. Tulisijan rakenne ja savukaasun kierto. (Kuva: Olli-Matti Heiskanen)

Vesikiertoisissa lämmityskattiloissa käytetään myös alapalo ja käänteispalo menetelmiä. Alapalossa palotapahtuman primääri-ilma ohjataan polttoaineen varastopesän läpi arinalla tapahtuvaan palotapahtumaan. Muodostuvat pyrolyysikaasut ohjataan usein polttoainesäiliön takana sijaitsevaan erilliseen palopesään, jonka palotapahtumaa säädetään sekundääri-ilman syötöllä (Ruuttu 2019). Lopputuloksena saadaan yläpaloa puhtaampi palaminen ja kaasujen korkeampi lämpötila, joka parantaa kattilan hyötysuhdetta. Käänteispalomenetelmä on samankaltainen alapalon kanssa, mutta siinä palaminen tapahtuu polttoainesäiliön alapuolella toisiopesässä, johon palavat kaasut imetään savukaasuimurin avulla. Toisiopesässä palamista säädetään usein elektronisen

logiikan avulla parhaimman mahdollisen hyötysuhteen ja mahdollisimman vähäisten päästöjen aikaan saamiseksi.

### 1.3 Käytettävät polttoaineet

Tulisijoissa käytetään vuosittain lämpöenergian lähteenä puuta 6,1 miljoonaa kiintokuutiota (VTT 2008). Suomessa poltetaan pääosin omasta metsästä tehtyjä polttopuita (3,3 miljoonaa kiintokuutiota). Lämmitystarkoitukseen käytetään myös hakkuutähteistä ja puutavarajätteestä tehtyjä pilkkeitä.

Polttopuiden tehollinen lämpöarvo (taulukko 1) vaihtelee puulajeittain jonkin verran, poltettavan puun kosteuden ollessa 20 %, välillä 4,15–4,00 kWh/kg. Suurin energiatiheys on koivulla ja heikoin kuusella (VTT 2016). Suositeltava polttopuiden kosteus on 15–20 %, joka saavutetaan kuivattamalla pilkottuja puita ilmastivasti säältä suojattuna ulkotiloissa noin vuoden ajan. Myös lyhyempi aika voi riittää, jos kuivatus tapahtuu huhti-elokuussa.

Puulaji / Polttoaine	Tehollinen lämpö- arvo kWh/kg		Kos- teus- %	Energiatiheys	
				kWh/irto m <sup>3</sup>	kWh/pino m <sup>3</sup>
Mänty	4,15		20	810	1 360
Kuusi	4,10		20	790	1320
Koivu	4,15		20	1010	1700
Leppä	4,05		20	740	1230
Haapa	4,00		20	790	1330
	Kes- kiarvo	4,09			
Pelletti	4,7		10		

Taulukko 1. Eri puulajien ja pellitin lämpöarvoja (VTT 2016)

Puupelletit valmistetaan pääsääntöisesti metsäteollisuuden sivuvirroista, kuten lastuista, sahanpurusta ja hiomapölystä. Valmistusprosessi on melko yksinkertainen, jossa soveltuva raaka-aine puristetaan reikämatriisin läpi. Puristamisesta aiheutuva raaka-aineen lämmön nousu sulattaa puun sisältämän ligniinin, jolloin matriisin reikiin muodostuu sylinterin muotoisia kappaleita. Kappaleiden puristuessa ulos matriisista, ne pilkotaan sopivan pituisiksi pelleteiksi. Laadukkaan tuotteen valmistamiseksi ja laadun takaamiseksi prosessia valvotaan esimerkiksi standardin EN14961-2 mukaisesti. Standardissa määritellään esimerkiksi polttoaineen mitat, kosteus, mekaaninen kestävyys, irtotiheys, tehollinen lämpöarvo, hienoaineen osuus, tuhkapitoisuus, sideaineiden osuus ja eri alkuaineiden pitoisuudet (Vapo 2013).

Puupelletin polttopuita suuremman energiasisällön 4,7 kWh/kg (Vapo 2013), ympäristöystävällisyyden ja palamisessa syntyvien polttopuita vähäisempien pienhiukkaspäästöjen vuoksi se soveltuu käytettäväksi tulisijoissa päästöjen vähentämistarkoituksessa. Pienen palakoon vuoksi pellettiä ei kuitenkaan voi polttaa sellaisenaan tyypillisillä tulisijojen arinoilla, vaan se vaatii jonkinlaisen laitteen pitämään polttoaineen arinan päällä ja ohjaamaan palamisilman virtausta.

## **2 Koejärjestely**

### **2.1 Koejärjestelyn tavoitteet**

Koejärjestelyllä tavoiteltiin laajan lämpötila- ja savukaasudatan keräämistä kehittämistyön tueksi ja toimintaperiaate ideoiden toiminnan toteamiseksi. Kehittämistyön ohessa haluttiin mitattua dataa perinteisen ja tyypillisesti käytössä olevan vanhan tulisijan toiminnasta. Myös sen toiminnan heikkouksista, sekä mahdollisuuksista tulisijan toiminnan tehostamiseksi pienillä muutoksilla. Polttokokeiden ajoituksilla haluttiin luoda mahdollisimman identtiset lähtökohdat jokaiselle erilliselle koepoltolle, jotta saadut tulokset olisivat vertailukelpoisia keskenään.

## 2.2 Paloturvallisuus

Puupelletin polttolaitteen kehittämisessä on huomioitava myös paloturvallisuus. Paikalla muurattujen eli tiilestä tai kivistä valmistettujen tulisijojen paloturvallisuusohjeissa määritellään vaatimukset tulisijan rakentamiselle (RakMk E8). Ympäristöministeriön asetuksessa savupiippujen rakenteista ja paloturvallisuudesta määritetään rakennevaatimukset paikalla muuratulle savupiipulle. Suurin sallittu lämpöteho yhteen vähintään 120 mm seinämänpaksuudeltaan olevaan hormiin on 60 kW. Jos yhteen hormiin johdettava lämpöteho on 60–120 kW, pitää hormin seinämän olla vähintään 230 mm paksu. Muurattu hormi on pinnoitettava rakennuksen sisäpuolisilta osilta kattoon asti A1-luokan palonkestävällä tasoitteella. Jos hormiin johdettavien savukaasujen lämpötila ylittää 350 °C-astetta, on käytettävä joustavaa lämpökuormituksen kestävästä laastia (Finlex 2017).

Tulipesään sijoitettaville pellettikoreille ei varsinaisesti ole erillisiä paloturvallisuusohjeita, joten suunnittelussa voi soveltaa tulen kestävästä materiaalin määrittelyä. Tulipesän sisäiset puupelletin polttolaitteet ovat näin arinaan verrattavia irtonaisia tulisijan osia.

## 2.3 Koejärjestely

Testausalustana toimi 1950-luvulta peräisin oleva, tiilistä muurattu varaava takkauuni. Tulisijan sisälle asetettiin erityyppisiä termoparikaapeleita tarkoin harkittuihin pisteisiin monipuolisen lämpötiladatan keräämiseksi (kuva 3). Tärkeimmät mittauspisteet ovat sivuposkien yläosat tulipesän yläreunan tasalla (64 senttimetriä arinatasosta) ja molempien sivuposkien alareunojen savukanavat. Lisäksi yksi kaapeli mittasi huoneilman lämpötilaa ja yksi tarvittaessa polttoainesäiliön lämpötilan nousua. Sivuposkien yläpuolista lämpötilaa mittaavat kaapelit joutuvat huomattavaan lämpörasitukseen, koska liekit yltävät mahdollisesti sivuposkiin saakka. Kyseisissä mittauskohdissa päätettiin käyttää TC-tyyppistä keraamisesti pinnoitettua termoparikaapelia, jonka maksimilämpönkesto on +1 400 °C. Muissa mittauspisteissä käytettiin PVC -pintaisia kaapeleita, joiden lämmönkeston maksimi on +105°C. Kuudennen koepolton jälkeen huoneilman ja polttoainesäiliön lämpötilaa mittaavat termoparikaapelit sijoitettiin

mittaamaan tulisijan kylkien pintalämpötiloja teippaamalla ne folioteipillä tulisijan kylkiin kiinni (liite 2).

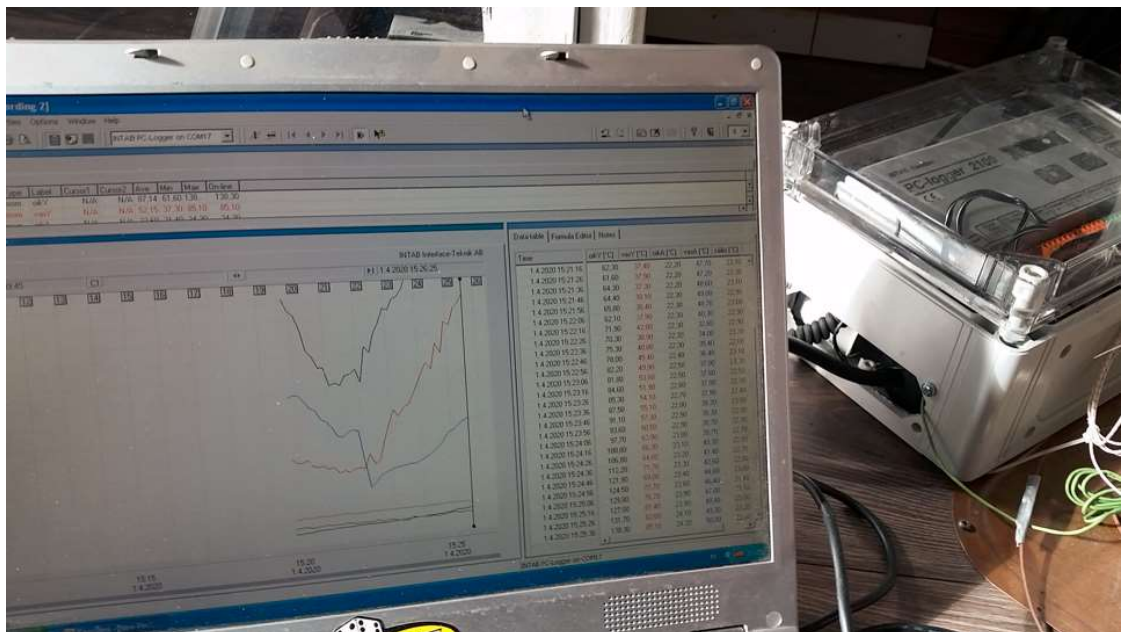
### **2.3.1 Lämpötila**

Termoparikaapelien lämpötiladataa kerättiin Intab 2100 PC-logger -dataloggerilla, jolta data purettiin tietokoneelle EasyView5- ohjelmalla (kuva 4). Dataloggerissa on kahdeksan kanavaa, jotka voi asettaa tallentamaan yksilöllistä lämpötiladataa. Datan tallennusvälin voi asettaa halutun tarkkuuden mukaisesti. Koepoltoissa käytettiin kymmenen sekunnin tallennusväliä. PC-Logger 2100 laitetta voi käyttää myös ilman tietokonetta ja tarkastella jokaisen kanavan hetkellistä lämpötilaa yksitellen pienestä lcd-näytöstä. EasyView5- ohjelmalla saa tallennettua lämpötiladatan käyrinä .jpg- kuvamuodossa (liite2) ja .txt tekstitiedostona. Ohjelmasta nähdään taulukossa ja käyrämuodossa reaaliaikainen lämpötilakehitys jokaisen lämpötilaa mittaavan kanavan osalta (kuva 4.)

Koepolttojen välillä odotettiin tulisijan jäähtymistä huonelämpötilan tasalle, joka vaihteli +20 °C- asteen ja +22 °C- asteen koepolttojen välillä.



Kuva 3. Mittauspisteet merkittynä oranssilla (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).



Kuva 4. EasyView5 ja Intab 2100 (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

### 2.3.2 Savukaasu

Savukaasujen mittauksissa käytettiin kuvan 5 Testo 310 savukaasuanalysaattoria. Analysaattorin mittauspää asetettiin savupiippuun hormin sulkupellin aukosta. Sulkupelti otettiin mittauksen ajaksi pois, jolloin anturi pystyttiin työntämään savukaasun virtaukseen täyden palamisen vaiheessa. Sulkupellin pitkulaisen aukon peittämiseksi valmistettiin erillinen sovitin 1 millimetrin paksuisesta teräspellistä, joka kiinnitettiin tiiviisti savupiippuun folioteipillä mittaustarkkuuden maksimoimiseksi.



Kuva 5. Savukaasuanalysaattori, näytössä mitattu savukaasun CO pitoisuus ja lämpötila. (Kuva: Olli-Matti Heiskanen)

## 2.4 Koepoltto

Ennen polton aloittamista kirjattiin muistiin sytytyksen kellonaika, huoneen lämpötila, tulisijan sisälämpötila, ulkolämpötila, ilman suhteellinen kosteus, käytetty polttolaite, polttoaine ja polttoainemäärä gramman tarkkuudella (liite 2, taulukko 1). Hiilloksen siinnyttyä kirjattiin sulkupellin sulkemisen kellonaika.

Koepolttoissa oli tarkoitus polttaa jokaisella neljällä menetelmällä ja polttoaineella kolme panosta, yhteensä 12 koepolttoa, tulosten luetettavuuden ja vertailukelpoisuuden varmistamiseksi. Dataloggeri asetettiin keräämään lämpötilatietoja ennen polttoaineen sytytystä ja tietojenkeräys lopetettiin noin viisi minuuttia hormin sulkupellin sulkemisesta, jotta nähdään tulisijan sisälämpötilan kehitys hormin vedon loputtua.

Polttoaineena käytettiin Vapon valmistamaan havupuupellettiä ja ylivuotisia sekapuupilkkkeitä. Polttopuita kuivattiin vuorokausi sisätiloissa ennen koepolttoa. Polttoaineen sytyttämiseen käytettiin sytytyspusseja, joilla varmistettiin tasainen syttyminen.

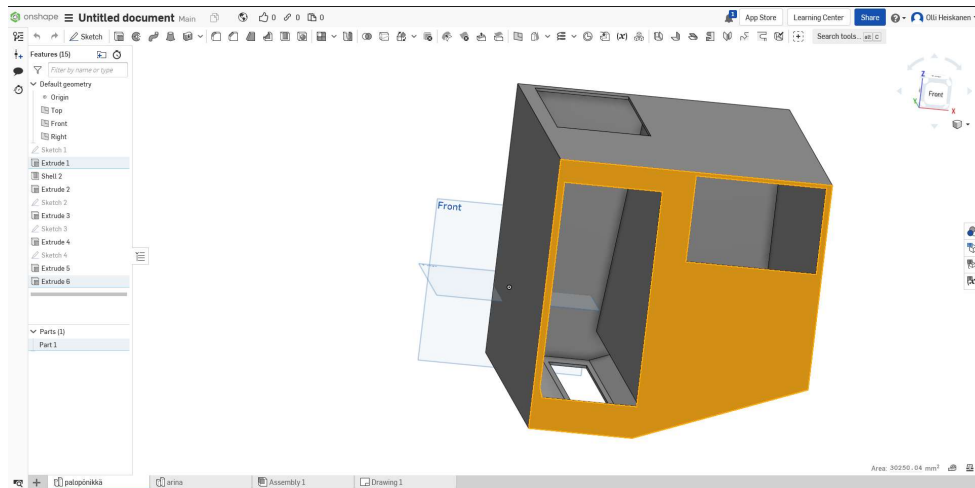
Tulisijan välittömään läheisyyteen sijoitettiin häkävaroitin poltossa mahdollisesti muodostuvan hiilimonoksidin vuoksi. Myös huonetilan katossa sijaitsevan palovaroitin pariston kunto ja viereisessä huoneessa oleva jauhesammutin tarkistettiin. Myös tulisijan ympäristön siisteydestä huolehdittiin.

## 3 Polttolaite

### 3.1 Suunnittelu

Päällimmäisenä tavoitteena oli parantaa tulisijan käyttömukavuutta ja kokeilla pelletin toimivuutta vanhassa tulisijassa. Polttimen suunnittelu aloitettiin mittaamalla tulipesän mitat polttolaitteen koon määrittämiseksi. Kokomitoituksessa oli otettava huomioon tulipesän epämääräinen muoto ja se toi omat haasteensa laitteiden mahduttamiseen tulipesän sisälle. Suunnittelussa käytettiin apuna kuvassa 6 näkyvää Onshape 3D -mallinnusohjelmaa, jolla voitiin kokeilla erilaisia laitteen muotoja ja kokoja.





Kuva 6. Onshape 3d -ohjelman näkymä (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

Tulipesän tilavuuden asettamien rajoitteiden ja laskennallisen syöttöenergian tarpeen perusteella pystyttiin määrittämään tarvittava pellettipanos, jotta tulisi-jaan saadaan polttopuita vastaava turvallinen syöttöenergia. Poltinlaitteen lämpötehon laskennallinen maksimi ei luonnollisesti saa ylittää hormille määritettyjä raja-arvoja, joten mitoitus on syytä polttopuiden sisältämän lämpöenergian mukaisesti.

Tämä saadaan laskettua kaavalla 1.

$$E = q * m$$

missä

E = syöttöenergia (kWh)

q = tehollinen lämpöarvo (kWh/kg)

m = polttoaineen massa (kg).

Polttoaineen kertapanoksen massan mitattiin olevan noin 5 kg. Polttopuiden lämpöarvon keskiarvo ollessa sekupuilla 4,09 kWh/kg.

$$\text{Tällöin } E = 4,09\text{kWh/kg} * 5,0\text{kg} = 20,45 \text{ kWh}$$

Pellettimäärä saadaan samaa kaavaa soveltaen

$$m = \frac{E}{q}$$

Syöttöenergian 20,45 kWh ja pelletin lämpöarvon 4,7 kWh/kg osamääränä saadaan tarvittavaksi pellettimäärässä 4,35 kilogrammaa. Pellettipanoksen tilavuuden määrittämiseksi tarvitaan pelletin tiheys  $\rho$ . Tiheys  $\rho$  määritetään kaavalla 2.

$$\rho = \frac{m_1}{V_1}$$

jossa

$m_1$  = pelletin varastointi massa (650 kg)

$V_1$  = pelletin varastointi tilavuus (1 000 dm<sup>3</sup>).

Panoksen tilavuus saadaan samaa kaavaa soveltaen.

$$V = \frac{m}{\rho}$$

jossa

$V$  = pellettipanoksen tilavuus (dm<sup>3</sup>)

$m$  = pellettipanoksen massa (kg)

$\rho$  = pelletin tiheys (kg/dm<sup>3</sup>).

tällöin

$$V = \frac{4,35 \text{ kg}}{0,65 \text{ kg/dm}^3} = 6,69 \dots \sim 6,7 \text{ dm}^3$$

Panoksen tilavuudeksi saatiin näin 6,7 kuutiodesimetriä.

### 3.2 Toteutus

Polttolaitteiden prototyypit valmistettiin kahden millimetrin paksuisesta teräspelistä. Tarvittavien kappaleiden leikkaamiseen käytettiin plasmaleikkuria ja kul-

mahiomakonetta. Liitokset kappaleiden kiinnittämiseksi kokonaisuuksiksi hitsattiin mig -menetelmällä. Arina (kuva 7) materiaalina käytettiin 5 mm:n paksuista ja 20 mm leveää teräksistä lattarautaa. Arinat soveltuvat molempiin suunniteltuihin laitteisiin.



Kuva 7. Arinaratkaisu (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

### 3.3 Polttolaitteen rakenne

Suunnittelun alkuvaiheessa hankittu kaupallinen polttokori (kuvat 8 ja 9) havaittiin tehottomaksi suuren ilman ohivirtauksen ja siitä johtuvan hitaan hiilien palamisen loppuvaiheen vuoksi. Kori ei myöskään kestänyt kovin montaa käyttökerää ja muutti muotoaan useaan suuntaan, kuten kuvasta 9 voidaan havaita. Aikaisempien puu pelletin polttokokemusten ja kaupallisen polttokorin testauksen perusteella todettiin, että pellettien tehokas loppuun palaminen vaatii tarkasti ohjatun ilmavirtauksen. Tämä voidaan todeta liitteen 1 taulukon 2 palamisajoista ja tuhkan määrästä, joissa eroa huomattavasti.



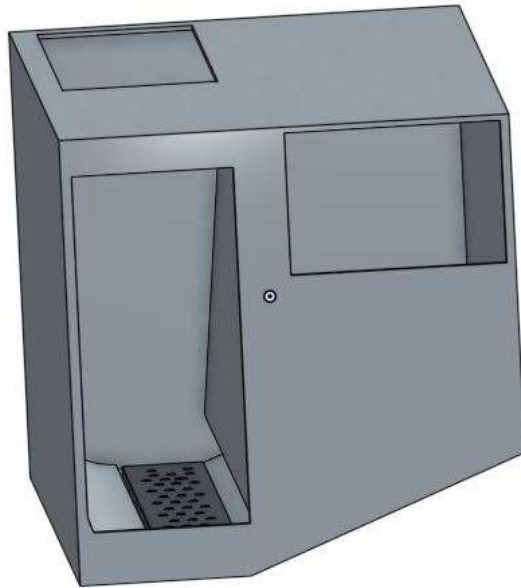
Kuva 8. Polttokori (Kuva Olli-Matti Heiskanen).



Kuva 9. Kuumuuden vaikutus verrokkina olleen polttokorin rakenteeseen (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

### 3.3.1 Versio P

Ilman kohdennettu ja hallittavissa oleva virtaus huomioiden suunniteltiin uunin tulipesään mahtuva laite, joka sisältää pienen tulipesän ja riittävän kokoisen polttoainesäiliön. Polttoaine valuu säiliöstä painovoimaisesti arinalle, jossa se palaa tehokkaasti ja hallitusti.



Kuva 10. 3d mallinnettu suunnitelma (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

Tulipesän viereen sijoitettu polttoainesäiliö (kuva 10.) mahdollistaa polton aikaisen pelletin lisäämisen, mikä on mahdotonta panos-tyyppisissä laitteissa. Tulipesän kuumuuden vuoksi laitteen keskellä oleva väliseinä on eristetty polttoaineen säiliössä kaasuuntumisen ja syttymisen estämiseksi. Laitetta testattiin ja kehitettiin jo ennen varsinaisia koepolttaja useita kertoja, jotta kaasujen virtausta saatiin silmämääräisesti toimivaksi. Polttoainesäiliön pohjan kulmaa, jota pelletti valuu arinalle, jyrkennettiin alkuperäisestä 20 asteesta 40 asteeseen. Laitteen tulipesän takareunaan lisättiin sekundääri-ilmaputki, jotta paloa saataisi säädettyä tarkemmin (kuva 11). Vaikutuksesta palotapahtumaan saatiin pelkkä lämpötilatieto, joka ilmenee liitteessä 2 olevien koepolttajien lämpötila kaavioiden 3 ja 12 välisestä lämpötilahuipun noususta 610,3 °C- asteesta 962,4 °C-asteeseen.





Kuva 11. Sekundääri-ilmaputki (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

Tulipesän ja polttoainesäiliön väliseinän rakennetta muutettiin useaan kertaan. Aluksi seinä oli yksinkertainen kaksi millimetriä paksu teräspelti, jonka tulipesän puolelle asennettiin 10 mm etäisyydelle millimetrin paksuisesta teräksestä valmistettu lämpösuojalevy. Polttoaine kuitenkin syttyi säiliössä jo polton alussa, joten väliseinää muokattiin. Seuraavaan versioon tehtiin toinen 2 mm:n paksuinen kerros niin, että paksumpien levyjen väliin jäi 10 mm rako, jonne ohjattiin ilmaa säiliön puolelta levyn keskikohdasta ja ilman ulosvirtaus oli tulipesän yläreunaan. Viimeinen kehitysversio väliseinän osalta oli umpinainen palovillalla eristetty rakenne, josta lämpöpelti oli poistettu, koska havaittiin liekkien ohjautuvan lämpösuojan ja väliseinän väliin pahentaa säiliössä olevan polttoaineen syttymisongelmaa. Myös polttoainesäiliön kansi poistettiin, jolloin havaittiin säiliön kautta ohjautuvan ilman kääntävän liekin kaareutumaan vasemmalle, väliseinästä poispäin (kuva 12).

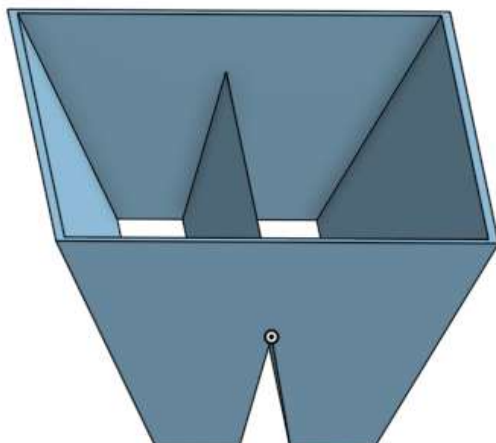


Kuva 12. Liekkien suunta (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

### 3.3.2 Versio W

Toiseen suunniteltuun laitteeseen, eli kuvissa 13 ja 14 esitettyyn W muotoiseen panospolttokoriin laitettiin kaksi erillistä arinaa. Panoksen palamisesta jäävät hiilet ohjataan kapeille arinoille, jotta ne palaisivat kuumasti ja nopeasti loppuun. Laitte mitoitettiin mahdollisimman tarkasti tulipesän leveyteen ja korkeus panoskoon perusteella riittävän tilavuuden varmistamiseksi.

W-polttokorin rakennetta muutettiin ainoastaan vähän testausten jälkeen. Ainoastaan arinoiden kannattimien asentoa käännettiin, jotta polttoaine valuu laitteen reunoilta arinoille ja siten hiilipalon kuumuus on ainevahvuudeltaan paksumman teräksen päällä polttokorin rakenteen vääntymisen vähentämiseksi.



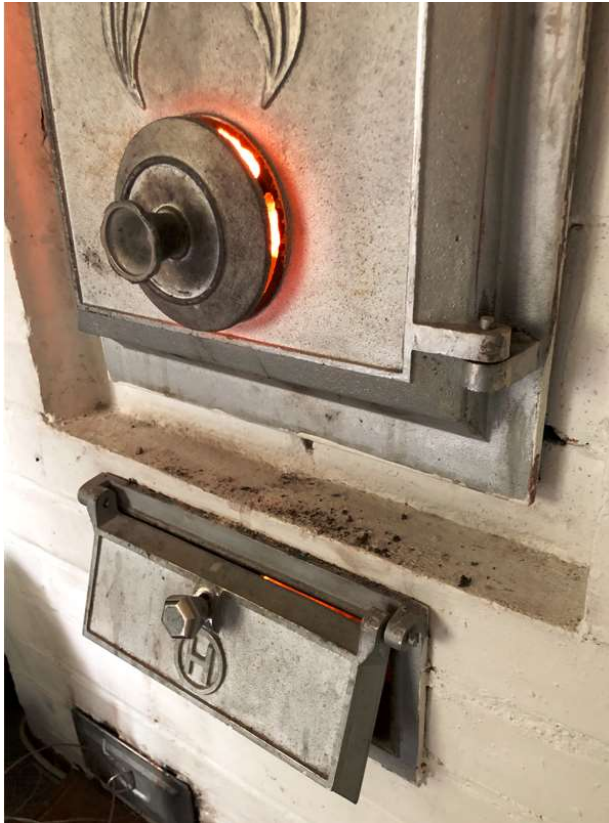
Kuva 13. Poltinlaitteen muoto 3d mallinnettuna (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).



Kuva 14. Poltinlaite tulisijassa valmiina ja 4046 grammaa havupuupellettiä juuri sytytetynä (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

Palamisilman määrää säädetään kuvassa 15 näkyvien luukkujen avulla. Tulisijan alaluukun rakoa suurentamalla tai pienentämällä säädetään ensiöilman määrää ja toisioilmaa tulisijan tulipesän luukussa olevalla säädöllä. Sekundääri-ilman säätöön on mahdollista rakentaa erillinen putki laitteen keskelle w- muodon kärkeen. Arinan ja tuhkaluukun välissä oleva aukko (kuva 13) tukittiin palovillalla ohivirtauksen estämiseksi.





Kuva 15. Ilmamäärän säätö (Kuva: Olli-Matti Heiskanen).

## 4 Tulokset

### 4.1 Palamisaika

Palamisaika vaihtelee jokaisessa koepoltossa, joten liitteen 1 taulukkoon on laskettu jokaiselle menetelmälle keskiarvoinen palamisaika. Jokaisella käytetyllä menetelmällä on suuria eroja palamisen kestossa yksittäisissä koepoltoissa, mutta keskiarvona palamisajat ovat noin kaksi tuntia. Poikkeuksena kaupallinen laite, jolla panoksen polttaminen vei keskimäärin noin neljä tuntia. Neljän tunnin poltoissa havaittiin vähäisen jäännöshiilen palamisen vievän jopa puolet mitausajasta, eli tulisijaa käytännössä jäähdytetään ylimääräisellä ilmanvirtauksella.

## 4.2 Lämpötila

Huippulämpötiloissa eri laitteiden välillä on merkittäviä eroja, kuten liitteen 1 kaaviosta 1 voidaan havaita. Lämpötilat vaihtelivat koepolttojen hetkellisten korkeimman (965,4 °C) ja alhaisimman (429,9 °C) huippulämpötilan välillä. Hormin sulkupellin sulkemisen jälkeen lämpötilat tasoittuivat 175,1 ja 77,1 °C-asteen välille. Korkeimmat lämpötilat palamisen aikana mitattiin P-mallilla koepoltossa 12, mutta tulisijan sisälämpötila kuitenkin laski hormin sulkupellin sulkemisen jälkeen samalle tasolle muiden menetelmien kanssa. Korkeat liekit eivät parantaneet savukaasun lämmön absorboitumista tulisijan tiilisiin konvektiopintoihin. Korkeimmaksi sulkupellin jälkeinen lämpötila jäi koepoltolla 5, jossa arinalla poltettiin polttopuita.

Lämpötilojen muutosta tarkasteltiin myös varianssianalyysin avulla. Menetelmä perustuu tilastollisten ryhmien välisten keskiarvojen eroihin. Ryhmät ovat tässä tapauksessa eri menetelmillä tehtyjen koepolttojen lämpötilan mittaustiedot 15 minuutin keskiarvolla laskettuna. Varianssianalyysin P-arvo kertoo riskin asetetulle hypoteesille, joka tässä tapauksessa oli, että onko tulisijan sivuposken yläosassa lämpötilavaihtelua eri polttomenetelmillä suoritettujen koepolttojen välillä. Liitteen 1 taulukosta 1 havaitaan, että lämpötila erot eivät ole tilastollisesti merkitsevä, koska riski on suuri P-arvo ollessa 0,090911. Siten sivuposken lämpötilavaihtelu eri menetelmien välillä ei ole tilastollisesti merkitsevä. Tulokseen vaikuttaa pieni aineisto ja aineiston sisäinen suuri hajonta.

## 4.3 Savukaasu

Palamisen aikana savukaasusta mitattu lambda-arvo vaihteli välillä 3,68 ja 9,13, joka on korkea luukulliselle tulisijalle, joten tulisijassa oli vielä liikaa hallitsematonta ohivirtausta vuotokohtien villoituksesta huolimatta. Sama voidaan päätellä savukaasun happipitoisuudesta, jonka alin mitattu arvo oli koepoltossa 9 polttopuilla 16,1 % ja korkein kaupallisella polttokorilla 18,9 %. Euroopan unionin päästömittaus standardissa EN 15250 päästömittauksessa sallittu savukaasun jäännöshappi saa olla 13 % mittaushetkellä uusissa sekä vanhoissa tulisijoissa (Reichert 2018).

Hormissa virtaavan savukaasun lämpötila vaihteli 118,1 °C-asteen ja 245 °C-asteen välillä. Korkein savukaasun lämpötila mitattiin P-mallilla koepoltossa 12 ja alhaisin kaupallisella polttokorilla koepoltossa 11. Hormiin johdetun savukaasun lämpötilat jäivät alle paloturvallisuusohjeiden 120 millimetrin seinämävahvuuden joustamattomalla laastilla muuratulle hormille määritetyn 350 °C-asteen rajan sulkupellin korkeudelta mitattuna. Liitteen 2 lämpötilakäyrien sininen ja vihreä viiva kertovat sivuposken alaosan lämpötilan nousseen hetkellisesti yli 350 °C-asteen.

Hiilimonoksidi eli CO vaihteli koepoltoissa 110ppm ja 798ppm välillä. Suurin hiukkaspitoisuus mitattiin koepoltolla 9, jossa polttoaineena käytettiin polttopuita. Pienin hiilimonoksidipitoisuus mitattiin W-mallisella polttimella. Puupelletillä saatiin polttopuuta alhaisemmat hiilimonoksiditulokset jokaisella menetelmällä. Hiilimonoksidin vähentämisen osalta siirtyminen polttopuista puupellettiin on saatujen tulosten perusteella käytetyllä tulisijalla hyvä ratkaisu. Mittausstandardin EN 15250 mukainen koko polton aikainen raja on 1500ppm.

## 5 Pohdinta

Puupelletin polttaminen tulisijassa on hyvä menetelmä lämmittää asuinrakennusta, jos palamisesta saa tehokasta. Kehitetyillä laitteilla saatiin tulisijaan sitoutumaan jonkin verran enemmän lämpöä, kun verrokkina testatulla kaupallisella versiolla. Valmistetut laitteet vaativat vielä lisää koekäyttöä ja kehitystä, mutta silti ne toimivat kokonaisuudessaan hyvin. Savukaasun häikäpitoisuutta saataisi todennäköisesti pienennettyä kohottamalla tulipesän lämpötilaa ja rajoittamalla sinne ohjautuvaa liiallisen ilman määrää, siten parantaen palamisen laatua. Testialustana käytetyn elinkaarensa päässä olevan tulisijan ilmavuodot eivät myöskään parantaneet mittaustulosten tai palamista.

Ensimmäisessä valmistetussa, versiossa P, on paljon kehityspotentiaalia ja se on muunneltavissa moniin eri tarkoituksiin, kuten grilleihin tai saunan kiukaan lämmitysmenetelmäksi. Kokoa on suurennettava jonkin verran, jotta polttoainesäiliön lämpötilaa saataisi alemmaksi ja polttoaineen kaasuuntuminen ja sytyminen säiliössä estettyä. Havaitusti nykyinen rakenne mahdollistaa epätäydellisen palamisen koepolton loppuvaiheessa polttoainesäiliössä. Myös

polttoaineen syöttökulma vaatii edelleen himan korjausta, koska havaitusti kuuma pelletti ei valu yhtä sujuvasti arinalle kuin kylmä. Toisioilmaputken sijoitusta ja mitoitusta parantamalla ja primääri-ilman säätömahdollisuuden lisääminen kaasut palaisivat täydellisemmin. Kuitenkin sekundääri-ilma putken lisääminen kohotti tulisijan lämpötilaa. Tällä laitteella saatiin sivuposken yläosaan mittausten kuumin lämpötila 962,4 °C- astetta eli palossa syntyvien liekki- piteus käytetyistä menetelmistä pisin. Toisaalta myös savukaasun lämpötila hormissa oli korkein mitattu 245 °C- astetta.

Toisessa versiossa eli mallissa W palamisen säätäminen on enemmän tulisijan ominaisuuksista kiinni, mutta silläkin onnistuttiin polttamaan pellettimäärä tehokkaasti ja huomattavan paljon nopeammin, kun verrokkina olleella kaupallisella laitteella. Ilmeisen onnistunut arinaratkaisu nopeutti hiilloksen siintymistä ja tulisijan lämmittäminen vastasi normaalia klapien polttoa. Palamisen loppuvaiheen nopeus on ratkaiseva ominaisuus, jotta vältetään tulisijan jäähdyttämiseltä ja tuntien pituiselta hiilloksen hehkumisen valvonnalta. Myös hiillosvaiheen muodostaman hiilimonoksidin huoneilmaan joutumisen riski alenee, koska hiillos ei jää kytemään tuhkan alle.

Kehitysprojekti oli mielenkiintoinen ja kiinnostava. Kehitykseen ja testaukseen käytettiin runsaasti aikaa ja vaivaa. Testaukseen käytetty tulisija ei ollut paras mahdollinen rakenteellisten ominaisuuksien vuoksi, mistä johtuen esimerkiksi ilmakerrointa ei saatu alle 3,68. Karelia ammattikorkeakoulun lainaamalla välineillä saatiin hyvin kerättyä tietoa tulisijan toiminnasta ja myös opinnäytetyön ohjaajalta käytännön apua, jotta osattiin keskittyä kehittämisessä ja raportoinnissa oikeisiin asioihin.

## Lähteet

- Ympäristöministeriö. 2019. Kansallinen ilmansuojeluohjelma 2030. Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-008-8>.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT. <https://www.motiva.fi/files/685/t2045.pdf>.
- Alakangas, E., Erkkilä, A., Oravainen, H. 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys – Polttopuun tuotanto ja käyttö. VTT. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.pdf>.
- Lähteenmäki, L. YLE. Takkojen verkkainen uusimistahti vähäpäästöisiin voi veittää hiukkasdirektiivin – tulisijat ovat kehittyneet tehokkaammiksi ja pienemmiksi, <https://yle.fi/uutiset/3-11782471>. 15.2.2021.
- Ruutu, N. 2019. Stokerikattilan automatisoinnin suunnittelu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/262479/Stokerikat-tila.pdf;jsessionid=8641228FF61CC0576AA1D27B23D6FD40?sequence=2>.
- Ympäristöministeriö. 1985. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa E8, muuratut tulisijat. Helsinki. <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/700001/1940>.
- Ympäristöministeriö. 10.11.2017. Ympäristöministeriön asetus savupiippujen rakenteista ja paloturvallisuudesta. Helsinki. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170745#Pidm45237816588016>.
- Motiva. Puupelletti lämmittää puhtaasti ja uusiutuvasti. 2021. [https://www.motiva.fi/files/6059/Puupelletti\\_lammittaa\\_puhtaasti\\_ja\\_uusiutuvasti.pdf](https://www.motiva.fi/files/6059/Puupelletti_lammittaa_puhtaasti_ja_uusiutuvasti.pdf). 10.11.2021.
- Pietiko.fi. <https://www.pietiko.fi/tuotteet/lampotilamittarit-loggerit-ja-anturit/termoparitarvikkeet/termoparikaapelit/tc-termoparikaapeli-k-pvc-7-0-2/>. 10.11.2021.
- Suomen tulisija- ja savupiippuyhdistys. <https://tsy.fi/tulisijat-osa-suomen-energiajarjestelmaa/>. 10.11.2021.
- VTT. 2014. Tulisijojen lämmönluovutus ja hyötysuhteet erilaisissa käyttötapauksissa, <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2014/T191.pdf>.
- VTT. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>.
- Vapo Oy. 2021. Vapon puupelletti – ominaisuudet ja laatukriteerit. 2013. [https://www.vapo.com/filebank/1465-Puupelletti\\_ominaisuudet\\_ja\\_laatukriteerit.pdf](https://www.vapo.com/filebank/1465-Puupelletti_ominaisuudet_ja_laatukriteerit.pdf)

Harvia Oy. 2019. <https://harvia.fi/wp-content/uploads/2016/10/takat5FFISV.pdf>.  
10.11.2021.

Reichert, G., Schmdl, C. 2018. Advanced test methods for firewood stoves.  
[https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/11/IEA\\_Bioenergy\\_Task32\\_Test-Methods.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/11/IEA_Bioenergy_Task32_Test-Methods.pdf).

Taulukko 1.

Anova: yksisuuntainen

## YHTEENVETO

<i>Ryhmät</i>	<i>Lukumäärä</i>	<i>Summa</i>	<i>Keski- arvo</i>	<i>Varianssi</i>
w	3	1733,829	577,943	1324,697
p	2	1389,281	694,6406	51243,03
k	3	1230,082	410,0274	4954,628

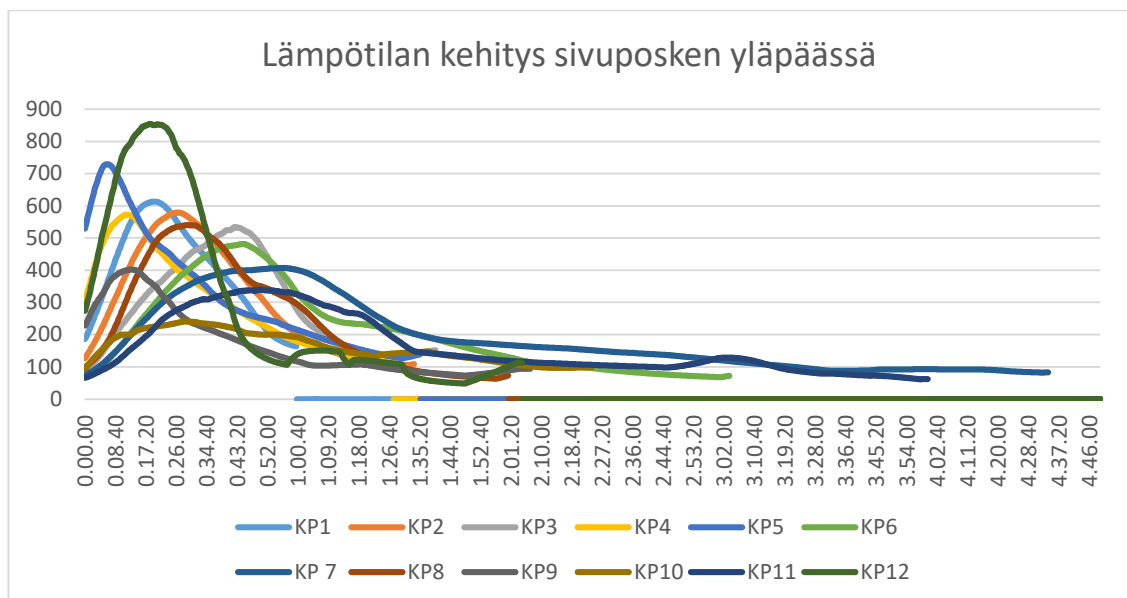
## ANOVA

<i>Vaihtelun lähde</i>	<i>NS</i>	<i>va</i>	<i>KN</i>	<i>F</i>	<i>P-arvo</i>	<i>F-kriit- tinen</i>
Luokkien välissä	102687,3	2	51343,66	4,023692	0,090911	5,786135
Ryhmissä	63801,68	5	12760,34			
Yhteensä	166489	7				

Taulukko 2.

Koe- poltto	Me- ne- telmä	Polt- to- aine	PA, Kg	Huone °C	Tuhka, kg	Koko- nais aika (h)	$\lambda$	eff	Savu- kaasu °C	CO <sub>2</sub> %	CO ppm	O <sub>2</sub>
KP1	W	Pel- letti	4,048	24		1.15.10						
KP2	W	Pel- letti	4,124	21,7		1.48.30						
KP3	P	Pel- letti	3,602	22		1.54.40						
KP4	arina	Puu	4,846	21		1.42.30						
KP5	arina	Puu	6,817	20,3		1.50.10						
KP6	Kau- palli- nen	Pel- letti	4,254	21		3.18.20						

KP7	Kaupallinen	Pelletti	4,429	23		4.49.10						
KP9	arina	Puu	4,046	22	0,046	2.21.40	3,68	87,40 %	121,3	5,14 %	798	16,10 %
KP8	W	Pelletti	4,046	21,9		2.15.20	4,66	74 %	195	3,81 %	110	16,90%
KP10	arina	Puu	4,046	22	0,074	2.39.10						
KP11	Kaupallinen	Pelletti	4,046	22	0,028	4.14.50	9,13	72,70 %	118,1	2,10 %	477	18,90 %
KP12	P	Pelletti	4,046	22	0,016	2.19.20	5,53	61,70 %	245	3,43 %	221	17,70 %



Kaavio 1. Lämpötilakehitys tulisijan yläosassa 15 minuutin keskiarvolla.



