

Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 7/2015

Selvitys puukaasun käytöstä viljan kuivauksessa

Saija Rasi, Pasi Suomi, Raimo Linkolehto, Lauri Tuunanen,
Kimmo Rasa, Fredrik Ek, Jyrki Kouki

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 7/2015

Selvitys puukaasun käytöstä viljankuivauksessa

Saija Rasi, Pasi Suomi, Raimo Linkolehto, Lauri Tuunanen,
Kimmo Rasa, Fredrik Ek, Jyrki Kouki

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2015



ISBN: 978-952-326-006-1 (Verkojulkaisu)

ISSN: 2342-7647 (Verkojulkaisu)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-006-1>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Saija Rasi, Pasi Suomi, Raimo Linkolehto, Lauri Tuunanen,
Kimmo Rasa, Fredrik Ek, Jyrki Kouki

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2015

Julkaisuvuosi: 2015

Kannen kuva: Janne Lehtinen /Luke

Selvitys puukaasun käytöstä viljankuivauksessa

Saija Rasi¹⁾, Pasi Suomi¹⁾, Raimo Linkolehto¹⁾, Lauri Tuunanen¹⁾, Kimmo Rasa¹⁾, Fredrik Ek²⁾, Jyrki Kouki³⁾

¹⁾ Luonnonvarakeskus (Luke), 31600 Jokioinen, etunimi.sukunimi@luke.fi

²⁾ Fiskarsin Voima, Nordanvik 142, 02580 Siuntio, Fredrik.Ek@slf.fi

³⁾ Työtehoseura, Kiljavantie 6 (PL 5), 05201 Rajamäki, jyrki.kouki@tts.fi

Tiivistelmä

Viljan lämminilmakuivauksessa käytetään yleisesti polttoaineena kevyttä polttoöljyä. Polttoaine muodostaa merkittävän osan viljankuivauksen muuttuvista kustannuksista. Mm. öljyn hinnan vaihtelut ovat nostaneet kiinnostusta käyttää kotimaista polttoainetta viljan kuivaukseen. Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli arvioida kuinka tehokas ja käyttökelpoinen puukaasulla ja puukaasulaitteistolla varustettu kuivuri on verrattuna perinteiseen öljykäyttöiseen kuivuriin. Tarkasteltava puukaasulaitteisto oli konttiin sijoitettava ja se oli suunniteltu liikuteltavaksi, mikä mahdollistaa puintikauden ulkopuolisen käytön myös muissa kohteissa, kuin kuivurin välittömässä läheisyydessä.

Puukaasua käytettäessä viljan loppukosteudet jäivät välille 13–14 %, eikä tavoiteltua 13 % viljan kosteutta saavutettu. Tämä johtui siitä, että kaasutuslaitteistolla ei kyetty tuottamaan poltettavaa kaasua riittävän tasaisesti ja riittävän pitkiä aikoja. Mittausten perusteella, käytettäessä polttoaineena öljyä energiahyötysuhde oli 78 % ja sähkön osuus kulutetusta energiasta 7 %. Puukaasulla vastaavasti energiahyötysuhde oli 64 % ja sähkön osuus kulutetusta energiasta 13 %. Tämän tutkimuksen perusteella ei voida sanoa, mikä toimivan laitteiston lopullinen hyötysuhde tulisi olemaan. Jatkotutkimuksissa laitteiston toiminta ja tekniikka pitää saada tasolle, jotta yhtäjaksoinen mittaus olisi mahdollista ja mittaukset olisi mahdollista toistaa riittävän usein.

Vaikka puukaasulla tehdyissä kokeissa vaihtelu oli suuri ja vaikka laitteisto ei teholtaan eikä säädettävyydeltään vastannut viljankuivauksen vaatimuksia, ovat tulokset kuitenkin lupaavia. Laitteistoa pitäisi kehittää edelleen niin, että se toimii oman säätöjärjestelmän ohjaamana ja että toimintaan tarvitsee puuttua ainoastaan polttoaineen lisäämiseksi ja hyvin vähäisten tarkastusten tekemiseksi. Kaasukuivausta edelleen kehitettäessä huomiota on kiinnitettävä varmatoimisuuteen ja kuivausaikaisen työmenekin minimoimiseen. Koetulosten perusteella polttotekniikka, ainakin lyhyillä toimintajaksolla, näyttää toimivan varsin hyvin.

Puukaasulaitteistosta hyötyisivät erityisesti sellaiset tilat, jossa on mahdollisuus hyödyntää tilan omaa haketta ja edellytykset hakkeen varastoinnille. Lisämahdollisuuksia tuo laitteiston liikuteltavuus, mikä mahdollistaa energian tuotannon muihin tarkoituksiin, jos niitä tilalla on. Liikuteltavuus mahdollistaa myös sellaisen liiketoiminnan, jossa maatila ostaa viljan kuivauksen ulkopuoliselta yrittäjältä. Puintikauden ollessa kuitenkin lyhyt, edellyttää tämä toimintatapa sitä, että yrittäjällä on laitteistolle käyttöä puintikauden ulkopuolellakin. Laitteiston liikuteltavuuden lisäksi etua tuo, että kaasua voidaan jakaa myös esimerkiksi tuotantorakennusten lämmitysjärjestelmiin. Jatkotutkimuskohteina voisivat olla esimerkiksi kasvihuoneet, missä lämpöenergian lisäksi voitaisiin hyödyntää laitteiston tuottama hiilidioksidi. Lisätutkimusta vaatii myös neste- ja hiilifraktioiden loppusijoitus ja/tai hyötykäyttö.

Maa- ja metsätalousministeriön rahoittama hanke toteutettiin syksyllä 2014 Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen (MTT), Fiskarsin Voiman ja Työtehoseuran (TTS) yhteistyönä.

Asiasanat: Hake, puukaasu, kotimainen energia, viljan kuivaus

Abstract

Fuel costs are significant portion of total costs of grain drying and oil is still the most generally used fuel. One of the reasons for increasing interest for using local fuel is the increasing price of oil. The aim of this study was to evaluate the grain drying with wood gas compared to traditional drying using oil as the fuel. Gasification unit that was used was placed in a shipping container and it was designed as removable, which allows to use it in other purposes also when grain drying is not needed.

When wood gas was used, grain moisture was from 13 to 14 %. The aim was that grain moisture is 13% but it was not achieved because the production of gas was not stable enough with the used gasification system. According to measurements, energy efficiency with oil was 78% while with wood gas 64%. The portion of electricity of used energy was 7% with oils and 13% with wood gas. Based on the results gained from these experiments, the final efficiency could not be defined because of the variation between different measurements.

Even though there was variation in different experiments done during this study, the results were promising. The equipment needs more developing but wood gas has potential for grain drying. The best benefit with gasification process is gained on farms, where own wood chips can be used and there is enough storage for fuel. The fact that the equipment is removable, gives more benefits as grain drying season is short and the equipment can be used for other purposes during the year. Removable equipment brings also business opportunities as grain drying can be bought from entrepreneur. Produced gas can also be distributed to other energy production systems, e.g. heating of farm buildings.

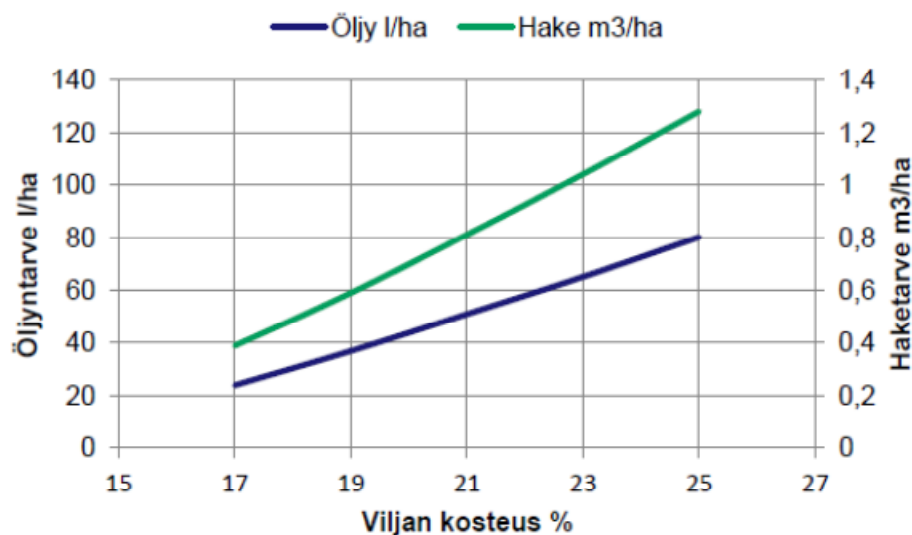
Keywords: Woodchip, wood gas, local energy, grain drying

Sisällys

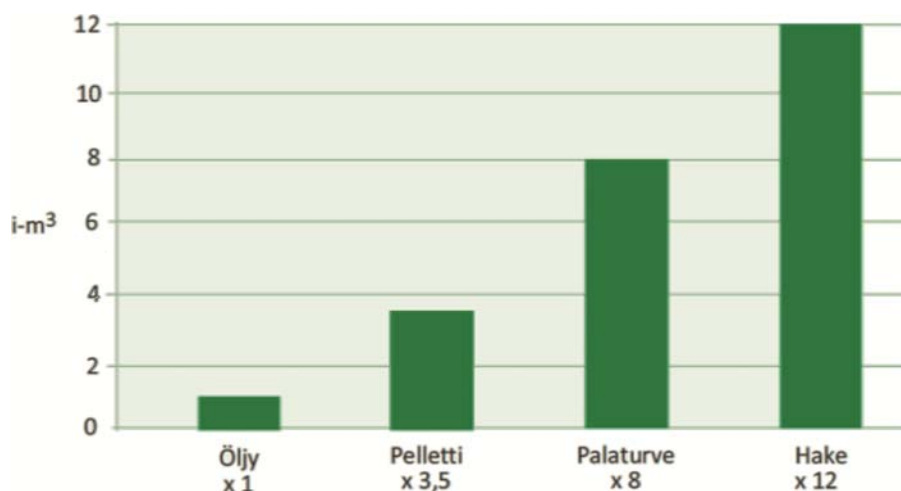
1. Johdanto	6
2. Aineisto ja menetelmät	8
2.1. Laitteiston asentaminen, modifiointi ja anturointi mittauksia varten	8
2.2. Testeissä käytetty puuhake	9
2.3. Mittausten vaatimat mittalaitteet ja mittausohjelma	10
2.4. Viljan kuivaus	12
2.5. Mittausten aikana tehdyt turvallisuustoimenpiteet	13
2.6. Kaasuanalyysit	14
2.7. Hiilen analyysit	14
2.8. Päästömittaukset	14
3. Tulokset ja tulosten tarkastelu	15
3.1. Laitteiston toimivuus	15
3.2. Kuivauksen mittausdata	15
3.3. Kooste turvallisuustoimenpiteistä	20
3.4. Puukaasun koostumus	20
3.5. Hiilen koostumus	21
3.6. Päästöt ilmaan	21
4. Jatkotutkimustarpeet	24
5. Johtopäätökset	24
Kirjallisuus	25

1. Johdanto

Viljan lämminilmakuivauksessa käytetään yleisesti polttoaineena kevyttä polttoöljyä. Polttoaine muodostaa merkittävän osan viljankuivauksen muuttuvista kustannuksista, jokaista haihdutettua vesikiloa kohden tarvitaan noin 0,15 l polttoöljyä. Hehtaarin sadon kuivaamiseen tarvitaan viljan kosteudesta riippuen 30–70 l öljyä (kuva 1). Polttoöljyn litrahinta on parin viime vuoden aikana vaihdellut 45 ja 85 sentin välillä (alv. 0 %). Puintikosteudeltaan 21 % viljassa 10 sentin muutos öljyn hinnassa muuttaa kuivauskustannusta n. 1,3 €/t. Mm. öljyn hinnan vaihtelut ovat nostaneet kiinnostusta käyttää kotimaista polttoainetta viljan kuivaukseen. Puuhakkeen ja turpeen polttolaitteet ovat kehittyneet huomattavasti viime vuosina. Toimivuus ja säädettävyys ovat automatiikan ansiosta jo lähes öljypoltinten tasolla. Kotimaista polttoainetta viljankuivaukseen käytäviä kohteita on arviolta n. 100. Hakkeen energiatiheys on kuitenkin öljyä alhaisempi (kuva 2), mikä edellyttää isoa polttoainevarastoa, riittävän isoa syöttösiiloa sekä polttoaineiden koneellista käsittelyä. Esimerkiksi kaurantuotannossa kuivaus vastaa 18 % kokonaisenergiankulutuksesta, joten fossiilisen polttoaineen korvauksella voidaan vaikuttaa merkittävästi tilan hiilijalanjälkeen (Ahokas 2012, Karelia 2014, Lötjönen & Kässi 2010, Koskiniemi 2009).



Kuva 1. Öljyn ja hakkeen tarve viljan kuivauksessa (Ahokas 2012).



Kuva 2. Polttoaineiden tilavuusvertailu (Koskiniemi 2009).

Bioenergian käyttö lämminilmakuivauksessa tuo useita etuja. Bioenergia on käyttökustannuksiltaan edullinen vaihtoehto (taulukko 1), se vähentää tilan hiilijalanjälkeä, kierrättää rahaa paikallistaloudessa ja tekee märkien erienkin kuivauksen mielekkäämmäksi. Bioenergian käyttö lisää kuitenkin työtä kuivaussesonkiin ja vaatii yleensä isommat kiinteät kustannukset (Karelia 2014).

Taulukko 1. Lämmöntuotannon energiavaihtoehdot (Karelia 2014).

		Hake	Puu-pelletti	Turve-pelletti	Pala-turve	Kaura	Kevyt polttoöljy
Kosteus	%	23-35	8-10	8-15	25-40	14	
Irtotiheys	kg/m ³	250-350	600-650	750	350-400	520-590	
Energiaa	kWh/i-m ³	700-900	2900-3900	3300	1400	2200-2500	10000
Tuhkaa	ka %	0,5-2	0,5	1-1,4	4-6	5-7	
Hinta	snt/kWh	1,8-2,6	4,4	3,5	2,5	4,4	9

Bioenergia ratkaisut voidaan toteuttaa ilmauunin tai vesilämpökeskuksen avulla. Ilmauuni on kuivauksen yksittäisratkaisu ja siinä on yksinkertainen toimintaperiaate, se toimii kuivauksessa öljyuunin tapaan. Kaupallisia malleja on saatavilla kokoluokassa 300–650 kW. Teknisiä ratkaisuja on saatavana konttiratkaisuna tai erillislaitteina. Jäähdytysaika on yleensä noin puoli tuntia pidempi kuin öljyuunilla, mutta konvektoriosa on noin 50 % suurempi kuin öljyuunilla. Koska lämminilmakuivureiden lämpötehontarve on suuri (200–1000 kW), on tämän tehosen kiinteän polttoaineen lämpökeskuksen hankintahinta yleensä korkea. Kiinteää polttoainetta käytettäessä mekaniikkaa, automatiikkaa ja tilaa tarvitaan enemmän kuin vastaavan tehosisen öljylämpöpöjärjestelmässä. Kuivauskausi kestää Suomessa korkeintaan kaksi kuukautta, joten kalliille investoinnille pitäisi löytää kuivurin lämmityksen lisäksi muutakin käyttöä. Maatilan lämmityslähteeksi kuivurin lämpökeskus sopii yleensä huonosti, sillä maatilan rakennusten lämpötarve on usein vain 5–20 % viljankuivurin tehontarpeesta. Näin alhaisella teholla lämmitettäessä kuivuriuunin hyötysuhde jää huonoksi. Vesilämpökeskus mahdollistaa lämmöntuotannon moneen kohteeseen ja antaa mahdollisuuksia varaajatekniikan käyttöön. Koska kuivurin tehontarve on reilusti rakennusten tehontarvetta suurempi, voisi ratkaisuna olla kaksi erillistä kattilaa samalla hakevarastolla. Käytännössä lämpökeskus olisi kuitenkin sijaittava lähellä kuivuria. Lämpökeskuksesta voidaan tuoda kuivurille lämpöä lämpökanaalin avulla ja luovuttaa se radiaattorin kautta öljykäyttöisen kuivurin lisälämmöksi tai korvata öljy näin kokonaan (Karelia 2014, Lötjönen & Kässi 2010).

Öljyn korvaajana toimii myös kylmäkuivaus, tai kuivaussiilo, joka perustuu ilman luontaiseen kuivauskykyyn. Kuivaussiilo on hyvissä sääolosuhteissa kustannustehokas kuivausratkaisu, eikä se rajoita pintikapasiteettia. Se sopii viljan tuuletukseen ja jäähdytykseen ja mahdollistaa lisälämmön käytön. Tekniikka vaatii kuitenkin huolellisuutta ja seuraamista laadun varmistamiseksi (Karelia 2014).

Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli arvioida kuinka tehokas ja käyttökelpoinen puukaasulaitteistolla varustettu kuivuri on verrattuna perinteiseen öljykäyttöiseen kuivuriin. Tarkasteltava puukaasulaitteisto on konttiin sijoitettava ja se on suunniteltu liikuteltavaksi, mikä mahdollistaa pintikauden ulkopuolisen käytön myös muissa kohteissa, kuin kuivurin välittömässä läheisyydessä.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1. Laitteiston asentaminen, modifiointi ja anturointi mittauksia varten

Fiskarsin Voima oy:n toimittama puukaasuprotolaitteisto (kuva 3) asennettiin Vihdissä MTT Vakolan kuivuriin 7.9.2014. Laitteistossa oli anturointivalmiudet mittauksia varten, laite oli sää-suojattu (kontissa) ja laitteeseen oli asennettu turvallisuuskomponentit (kaasun tulon suljenta ja puhaltimen sammutus polttimen sammussa, turvallisuus venttiilit ja siihen liittyvä automaation laajennus). Laitteiston ohjausta ei kytketty kuivurin ohjausjärjestelmään, vaan se toimi käsiohjauksella kuivurimittauksen ajan.

Laitteistossa oli syöttösiilo, johon mahtuu noin 6 m³ haketta. Hakkeen syöttö tapahtui kahden kuljetinruuvien ja yhden sulkusyöttimen kautta kaasuttimelle. Kaasuttimessa oli mekaaninen pinta-avahti ja liikkuva arina. Polttoaineen syöttö kaasuttimelle toimi ohjelmoitavan logiikan avulla automaattisesti.

Retrofit-laitteiston keskeisin komponentti on myötävirtaperiaatteen mukaan toimiva puukaasutin. Uutta puukaasuttimessa on, että kaasutinta voidaan säätää käytettävän polttoaineen ominaisuuksien mukaan. Poistuva tuotekaasu on lämmin ja tätä lämpöä palautetaan prosessiin siirtämällä sitä lämmönvaihdinten avulla kaasuttimen ensiöilmaan. Testien aikana yksi lämmönvaihdin puuttui kokoonpanosta. Kaasutin oli alkuun säädetty karkealle hakkeelle.

Tuhkanpoisto kaasuttimesta toimi kaasuvirran avulla ja tuhka erotettiin pyörrepuhdistimessa. Pyörrepuhdistimesta kaasutintuhka putosi tuhkatynnyriin. Syklonin perässä laitteistossa oli mekaanisesti puhdistettava kangassuodatin. Kangassuodattimen tarkoituksena oli erottaa kaasuvirrasta tuotekaasussa esiintyvän hieno noki, joka ei erotu syklonissa.

Kaasulinjassa kangassuodattimen jälkeen sijaitti kaasun jäähdytin. Lämmityskohteessa ei periaatteessa ole tarpeen jäähdyttää tuotekaasua, mutta jäähdytys helpottaa kaasun siirtoa. Jäähdytyksen jälkeen kaasu siirrettiin polttimelle muoviletkaa pitkin. Vakolassa tehdyissä testeissä ei hyödynnetty tuotekaasun jäähdytyslämpöä. Jäähdytyslämmön voisi käyttää kuivurin imuilman esilämmitykseen tai esimerkiksi polttoaineen kuivaukseen. Koelaitteistossa tuotekaasun siirtoon käytetyt sivukanavapuhaltimet olivat kaasulinjassa jäähdyttimen jälkeen. Tämä tarkoittaa että laitteisto oli lievästi alipaineinen puhaltimelle asti ja tästä polttimelle päin lievästi ylipaineinen.

Jotta laitteiston kytkeminen polttimelle olisi mahdollisimman yksinkertaista, polttimen palamisilma tuotettiin kaasutuskontissa olevien puhaltimien avulla ja siirrettiin polttimelle toista letkua pitkin. Kaasutuskontin ja tuotekaasupolttimen välissä kulki siis kaksi letkua, toinen tuotekaasulle ja toinen ilmalle. Koska kyseessä ei ollut markkinoilla oleva laite, jouduttiin aluksi tekemään säätöjen hakua. Myös laitteiston rakennetta muutettiin ja säädettiin. Näissä säädöissä käytettiin apuna Teston 350 XL mittaria, josta nähtiin välittömästi säätöjen vaikutus happi- ja häkäpitoisuuteen.



Kuva 3. Puukaasutus protolaitteisto

2.2. Testeissä käytetty puuhake

Kokeissa käytetyn hakkeen raaka-aine oli järeää kuitupuuta, jonka haketuksessa tuli hakkeen joukkoon myös liian isoja paloja (kuva 4), koska käytössä ollut hakkuri ei soveltunut näin järeille puille. Isot hakekappaleet tukkivat polttoaineen syötön ja ne pyrittiinkin poistamaan käsin ennen hakkeen siirtoa kaasuttimen siiloon. Poistamisyriyksistä huolimatta syöttölaitteeseen päätyi isoja kappaleita, jotka parissa vaiheessa aiheuttivat toimintahäiriöitä. Seuraavissa kokeissa siirryttiin käyttämään seulottua haketta, jossa partikkelikoko oli noin 10–40 milliiä (kuva 4). Osa testeistä ajettiin myös täysin seulomattomalla hakkeella.

Hakkeen laadun muutokset vaikuttivat odotetusti kaasuttimen toimintaan ja tuotekaasun puhtauteen. Tähän oli varauduttu tekemällä kaasuttimesta säädettävä, hakkeen ominaisuuksien muuttuessa kaasuttimen asetuksia myös muutettiin.



Kuva 4. Kokeissa käytettyä haketta, kosteus noin 13,5 % (vas karkeampaa haketta, oik pienempää). Osa ajoista ajettiin oikean kuvan mukaisella hakkeella, josta hienoainesta ei oltu seulottu pois.

2.3. Mittausten vaatimat mittalaitteet ja mittausohjelma

Puukaasulaitteiston mittaukset toteutettiin MTT Vakolan kuivurilla Kartano Jaakko 220 hl (kuva 5), joka on osa Cropinfra tutkimusalustaa (www.cropinfra.com). Kuivuriin oli instrumentoitu edellisissä tutkimushankkeissa mittausjärjestelmä, jonka avulla on mahdollista mitata viljan kuivatuksen energiapanokset perinteisessä öljykuivauksessa. Perusmittausjärjestelmällä mitataan kuivurin tulo- ja poistoilman lämpötila ja kosteus, ilmamäärä, öljyn ja sähkön kulutus ja ulkolämpötila. Mittausjärjestelmää laajennettiin puukaasulaitteiston testausta varten. Laitteiston instrumentointi määräytyi niin, että puukaasulaitteiston ja myös referenssimittauksena käytetyn polttoöljykuivauksen energiantuotto oli mahdollista laskea ulkolämpötilasta, kuivauslämpötilasta ja ilmamäärästä.



Kuva 5. MTT Vakolan kuivuri on osa Cropinfra tutkimusalustaa. Puukaasulaitteisto sijoitettiin kuivurin pannuhuoneen viereen mittauksia varten tehdyille mursketasanteelle.

Tehomittausten lisäksi puukaasulaitteistoa instrumentoitiin niin, että sen säätäminen ja tarkkailu oli mahdollista laitteiston toiminnan arvioimiseksi muun muassa jatkokehittämistä varten. Puukaasulaitteistosta mitattiin lämpötila arinasta, kaasun lämpötila ennen suodatusta ja ennen poltinta. Tämän lisäksi kaasun paineet mitattiin ennen suodatinta, ennen jäädytystä ja ennen poltinta. Puukaasulaitteistoa varten kuivuriin lisättiin 32 A virtapistoke. Virtapistokkeen asentanut asennusoikeudet omaava henkilö lisäsi pistokkeen yhteyteen energianmittausyhteen, jotta puukaasulaitteiston sähkönenergian kulutus oli mahdollista todentaa.

Kuivurin, puukaasulaitteiston ja ulkoilman mittaukset

Kuivuri:

- Poistoilman lämpötila poistoilmakanavassa
- Poistoilman kosteus poistoilmakanavassa
- Tuloilman lämpötila tuloilmakanavassa
- Poistoilman kosteus poistoilmakanavassa
- Tuloilmakanavan ilmamäärän mittaus
- Kuivurin sähköenergian kulutus

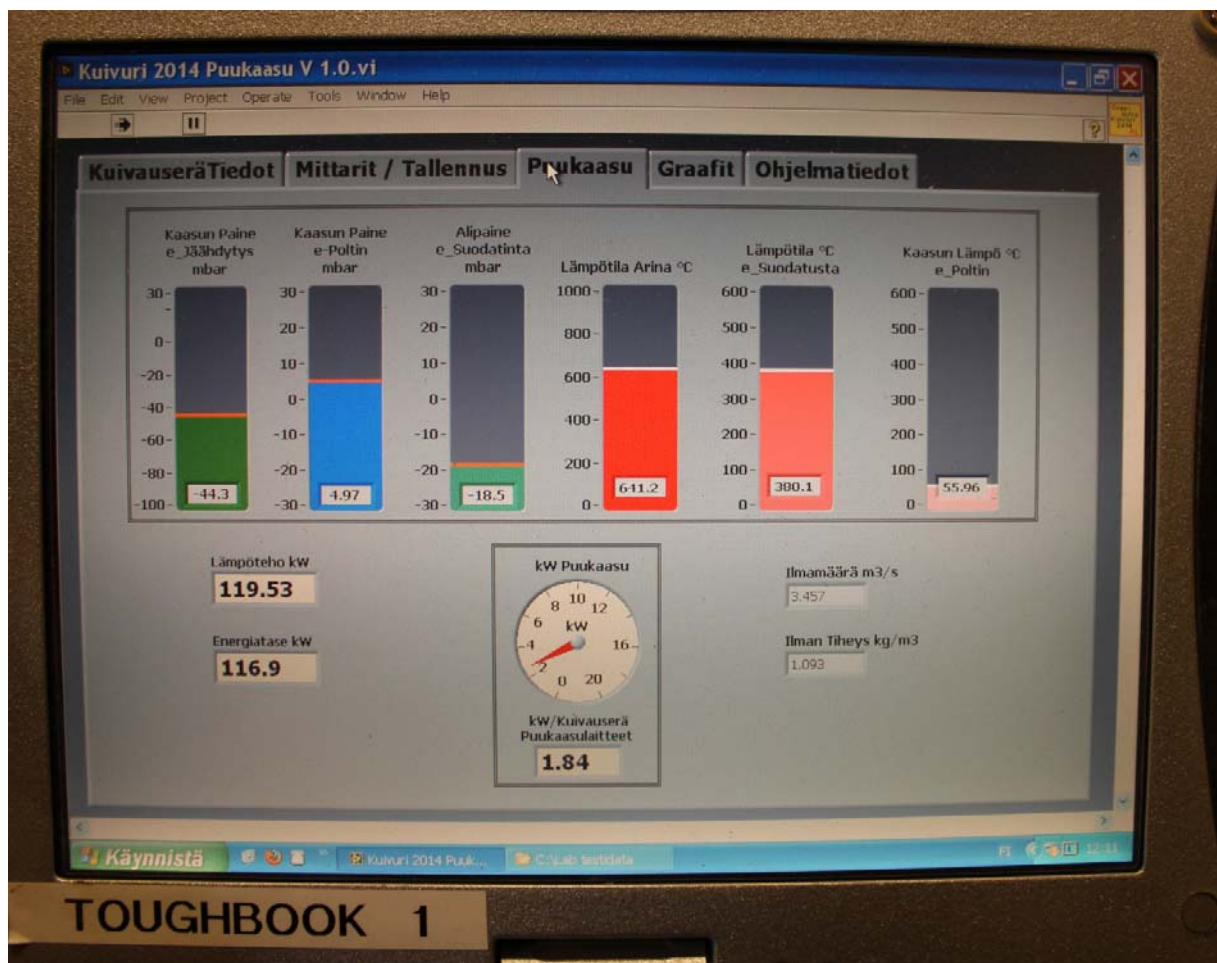
Puukaasulaitteisto:

- Puukaasulaitteiston sähköenergian kulutus
- Arinan lämpötila
- Lämpötila ennen suodatinta
- Alipaine ennen suodatinta
- Kaasun paine ennen jäähdytystä
- Kaasun paine ennen poltinta
- Kaasun lämpötila ennen poltinta

Ulkoilma:

- Ulkoilman lämpötila ennen puhallinta
- Ulkoilman kosteus ennen puhallinta
- Lämpötilaloggeri 1
- Lämpötilaloggeri 2

Mittausdata kerättiin 1Hz taajuudella kaikista mittauspisteistä. Datan keräämiseen käytettiin CropIn-fra kuivurimittaukseen tehdyn LabView ohjelmointikielellä toteutetun mittausohjelman laajennusta (Kuva 6). Käytössä oli myös kaksi mittausjärjestelmän ulkopuolista ulkolämpötilan mittausloggeria varmistamassa ulkolämpötilan paikkansapitävyys (aurion säteilyvaikutuksen kompensointi).



Kuva 6. LabView ohjelmointikielellä toteutetun mittausohjelman käyttöliittymä. Reaaliaikaisia puukaasulaitteiston mittaus tietoja, joita oli mahdollista tarkkailla, näytöltä hyödynnettiin laitteiston säätämässä.

2.4. Viljan kuivaus

Mittaukset toteutettiin puintikauden loppupuolella 5.9–17.9.2014, jolloin viljan (Ohra Fairytale) puintikosteus oli 15–18 % välillä. Koska puintikosteus oli riittävän alhainen lyhytaikaiseen varastointiin, viljaa ei esikuivattu varastoon mittauksia varten. Puinnin jälkeen vilja varastoitettiin suoraan tuoresii-loihin. Mittauserien viljan alku- ja loppukosteus määritettiin standardoidulla uunikuivausmenetelmällä. Viljanäytteet kerättiin kuivurin täytön ja purun yhteydessä muovipusseihin. Näytteiden kosteudet määritettiin samassa uunikuivatuserässä mittausjakson jälkeen.

Mittausajona varten kuivuriin ladattiin 16 m³ (Junkkari 160 peräkärry täynnä viljaa) viljaa. Lattavan viljan massa punnittiin ajoneuvovaa’alla (DINA 3, tarkkuus 10 kg), joka oli asennettu Hovin kuivurille (Kuva 7). Alkuperäisessä suunnitelmassa mittaukset oli tarkoitus toteuttaa klo 10–16 välillä ja mahdollisimman samanlaisissa sääoloissa. Puintikauden aikataulujen ja laitteiston epävarmuuksista johtuen mittaukset toteutettiin soveltavin osin silloin kuin laitteisto oli toimintakuntoinen ja kuivattavaa viljaa oli saatavilla. Öljymittausten 1 j 2 sekä puukaasumittausten 1, 2 ja 3 aikana ilman lämpötila vaihteli 10–22 °C välillä.



Kuva 7. Hoviin asennetun ajoneuvovaa’an avulla punnittiin viljaerien painot ja hankkeen kulutus. Vaa’an tarkkuus on ± 5 kg.

Öljymittauksia koskevat viljaerät kuivattiin, tavoitteena oli 13 % loppukosteus. Viljaerän läpi johdettavan ilman lämpötila säädettiin 70 °C:een. Öljyllä tehtyjen mittausten jälkeen öljypoltin vaihdettiin puukaasulle soveltuvaan polttimeen alihankkijan toimesta. Alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen, tutkijaryhmä päätti pitää viljamassan läpi virtaavan ilmamäärän samana kuin mitä se oli öljymittauksissa ollut, vaikkakaan 70 °C:een kuivatuslämpötilaa ei puukaasulla saavutettu. Kun ilmamäärää ei muutettu, puukaasukuivauksen tuloilmalämpötilaa oli helpompi verrata perinteiseen öljykuivaukseen. Ilmamäärällä ei myöskään ole vaikutusta laitteiston lämpöenergian tuottoon, joten senkin perusteella ilmamäärää ei haluttu muuttaa. Yhtenä tärkeä tekijä oli myös se, että kuivuri ja pannun parametrit haluttiin pitää vakioina molemmissa mittauksissa vertailun tasapuolisuuden vuoksi.

Kuivatuksen jälkeen vilja jäähdytettiin varastoitavaksi. Ennen varastointia viljamassat punnittiin ajoneuvovaa’alla. Loppupainoon vaikuttaa viljan kosteuden haihdunnan lisäksi esipuhdistimen imevien roskien ja pienten jyvien määrä eli ”esipuhdistusjäte”. Esipuhdistusjätteen määrään vaikuttaa eniten esipuhdistimen asento ja puitavan viljan puhtaus.

Kokeissa saatujen tietojen perusteella laskettiin energiataseet sekä puukaasulle, että öljylle. Öljykäytöllä energiataseeseen on laskettu öljyn sisältämä energia, sähköenergia ja kuivausilmaan siirtynyt energia. Puukaasulla vastaavaa tase muodostuu hakkeen energiasisällöstä, sähköenergiasta ja ilmaan siirtyneestä energiasta. Öljyn lämpösisältönä on käytetty arvoa 10 kWh/l ja hakkeen 4 kWh/kg (laskettuna kuivalle hakkeelle). Sähköenergian kulutuksesta on jätetty huomiotta kuivurin täytön, viljan jäähtymisen ja kuivurin tyhjennyksen osuus.

Laskennassa on käytetty seuraavia kaavoja:

$$P_{\text{ÖLJY}} = q * V(t)$$

Jossa,	$E_{\text{ÖLJY}}$	öljyn energiasisältö, kWh
	q	öljyn lämpöarvo, kWh/l
	$V(t)$	öljynkulutus l/h

$$P_{\text{PUU}} = q * m(T)$$

jossa	P_{PUU}	puun energiasisältö, kWh/kg
	q	puun lämpöarvo, kWh/kg
	$m(t)$	puun kulutus, kg/h

$$P_{\text{ilma}} = c_p * \rho / V(t) * (t_{\text{kuivaus}} - t_{\text{ulkoilma}})$$

jossa	P_{ilma}	Kuivausilmaan siirtynyt lämpöteho, kW
	c_p	ilman ominaislämpö, kJ/kg, °C
	ρ	ilman tiheys, kg/m ³
	$V(t)$	Ilman tilavuusvirta, m ³ /s
	t_{kuivaus}	Kuivausilman lämpötila, °C
	t_{ulkoilma}	ulkoilman lämpötila, °C

2.5. Mittausten aikana tehdyt turvallisuustoimenpiteet

Koska puukaasussa on komponentteja, jotka ovat erittäin helposti syttyviä ja myrkyllisiä, hankkeessa varauduttiin kaikilta osin turvallisuuden takaamiseen mittausten aikana. Laitteiston toimittanut alihankkija oli asentanut puukaasulaitteistoon turvaventtiilit, jotka toimivat silloin kun polttimen liekki vahti ilmoitti liekin sammuneen. Puukaasulaitteistolle asennettu virransyöttö suunniteltiin ja toteutettiin lainsäädännön mukaisesti alan asiantuntijan toimesta alihankintana. Kuivurin pannuhuoneeseen ja kuivaamorakennuksen alakertaan asennettiin häikävaroitimet, jotka olisivat antaneet hälytyksen, jos häkäkaasua olisi päässyt rakennuksiin.

Myös kuivurin pannun takaiskuventtiili tarkastettiin ja pannun ulkopuolella olevan savupiipun ulkomutkan puhdistuspellin pantaa löystytettiin. Toimenpiteillä pyrittiin varautumaan mahdolliseen räjähdykseen pannussa, jolloin räjähdyspaine pääsisi vapaammin pannusta ulos.

Mittauksien ajan laitteistojen vierellä oli alkusammutuskalusto ja vettä 1000 litran säiliöissä, joista oppopumpun avulla oli mahdollista saada sammutus-/jäähdytysvettä mahdolliseen paloon. Ennen puukaasulaitteiston käynnistämistä ja mittausten aloittamista paikan osoite ja hätänumero kerrattiin tutkimukseen osallistuvien henkilöiden kesken. Mittausten aikana MTT:n ja puukaasulaitteiston toimittanut asiantuntija olivat paikalla.

2.6. Kaasuanalyysit

Puukaasu näytteet otettiin kaasupusseihin, joista mitattiin häkä (CO), hiilidioksidi (CO₂) ja metaani (CH₄) Hewlett Packard HP 6890 kaasukromatografilla käyttäen lämmönjohtokykydetektoria (TCD). Uunin ja detektorin lämpötilat olivat 175 ja 250 °C. Rikkivety (H₂S), vety (H₂) ja happi (O₂) mitattiin GA-m kaasuanalysoitsattorin erillisellä elektrokemiallisilla kennoilla. Korkeiden pitoisuuksien vuoksi, näytkekaasu laimennettiin ennen mittauksia kaasukellon avulla.

2.7. Hiilen analyysit

Kaasutusprosessissa syntyvää hiilijaetta tarkasteltiin loppukäytön näkökulmasta. Hiilestä analysoitiin ravinne- ja raskasmetallipitoisuuden, PAH-yhdisteet ja kalorimetrinen lämpöarvo. Raskasmetallien määrittäminen oli SFS-EN 13650 standardi ”Maanparannus aineet ja kasvualusta. Kuningasve- teen liukenevien aineiden uuttaminen”. Menetelmää sovelletaan maan rakennetta parantavien ai- neiden (3A3) viranomaisvalvonnan analyysimenetelmänä, esimerkiksi tyyppinimelle Kasvipäriäinen kasvialustahiili. PAH-yhdisteet analysoitiin Metropolilab:n toimesta käyttäen uuttoluoksena toluee- nia. Hiilen lämpöarvo määritettiin kalorimetrisesti (Parr 6200 Oxygen Bomb Calorimeter, Parr Instru- ment Co. Moline, IL 61265, USA) käyttäen benzoehappoa (CAS 65-85-0, Cat No 3415, Parr Instrument Company) standardina (1108 Oxy-gen bomb, Parr Instrument Company).

2.8. Päästömittaukset

Savukaasujen lämpötila, palamishyötysuhde, hiukkaset, häkä (CO) ja typen oksidi (NO_x) pitoi- suusmittaukset ja päästöt sekä savukaasujen happipitoisuus mitattiin Testo 350+ XL ja Testo 380 kannettavilla kenttämittareilla. Mittaukset suorittivat työteho-seura (TTS). Mittarien rakenteesta joh- tuen niillä ei voi tehdä pitkiä jatkuvatoimisia mittauksia. Mittaukset tehtiinkin ottamalla 30 minuutin näytteitä savukaasuista, kun poltin-kattilayhdistelmä oli mahdollisimman hyvin jatkuvuustilassa. Tä- mä tarkoittaa tilaa, jossa laitteisto on säädetty haluttuun tilaan ja säätöjä ei muuteta tänä aikana. Samoin polttoaineen laatu ja kulkeutuminen laitteistoon on tällöin hyvää ja tasaista. Mittaukset tehtiin kahdeksan eri päivän aikana.

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1. Laitteiston toimivuus

MTT toteutti laitteiston mittaukset ja niihin liittyvät instrumentoinnit. Alihankkija vastasi laitteiston instrumentoinnista ja säädöistä mittausten ajan. Mittausten aikana laitteiston toimivuudessa oli epävarmuutta. Puukaasumittaukset saatiin kuitenkin toteutettua, vaikkakin kyseessä oli vielä prototyyppilaitteisto. Tämän tutkimuksen perusteella tehdyt havainnot laitteiston toimivuudesta luovat hyvät edellytykset laitteiston jatkokehittämiselle. Jos laitteiston toimivuuden kannalta suurimmat viat olisivat olleet tiedossa tai aikataulu olisi mahdollistanut niiden korjaamisen, puukaasulaitteisto olisi voinut saavuttaa öljykuivauksen tasaisen varmuustason lämmön tuotossa. Näin laitteiston toimivuuden ja tehokkuuden arviointi olisi ollut huomattavasti luotettavampaa.

Tutkimusten aikana havaittiin seuraavia ongelmia laitteiston toimivuudessa:

- Kaasupolttimen sulku häiriötilanteessa/liekin sytytyksessä ei aina toiminut kontaktihäiriön takia, joten laitteistoa jouduttiin ajamaan osittain ilman pannun liekkivahtia.
- Laitteiston teho jäi huomattavasti arvioitua pienemmäksi. Arinan lämpötila nousi tehoja nostettaessa korkeaksi, jolloin myös lähtevän kaasun lämpötila oli laitteiston suodattimelle liian korkea. Ongelmaksi muodostui se, että suodattimen materiaali ei kestänyt lämpötilaa, joka olisi vaadittu lämmitystehon nostoon.
- Kondenssiovesi aiheutti ongelmia laitteiston puhaltimissa ja imureissa.
- Laitteiston hakkeen syöttöjärjestelmä tukkeutui. Käytettävän hakkeen ominaisuuksilla ja laadulla on ratkaiseva vaikutus laitteiston kokonaistoimintaan. Hakkeen syöttöjärjestelmä asettaa vaatimukset hankkeen koolle, kaasutin ja arina asettaa vaatimukset hankkeen laadulle.

3.2. Kuivauksen mittausdata

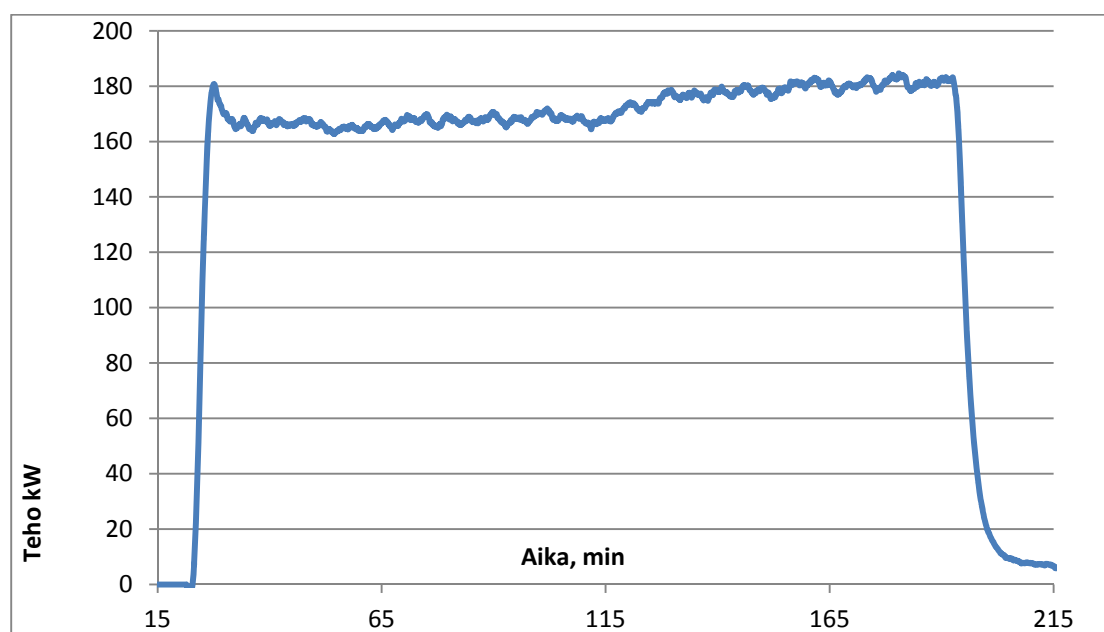
Kokeissa oli tarkoitus vertailla öljyä ja puukaasua viljankuivauksen energianlähteenä. Kaasutuslaitteistolla ei kuitenkaan kyetty tuottamaan poltettavaa kaasua riittävän tasaisesti ja riittävän pitkiä aikoja, joten tavoiteltua 13 % viljan kosteutta ei saavutettu. Siksi puukaasumittausten loppukosteudet jäivät välille 13–14 %. Puukaasumittauksen ensimmäinen kuivatus keskeytyi toimintahäiriön takia. Tässä vaiheessa viljan kuivaus oli vielä 14 %. Koska tavoitteena oli aloittaa uusi mittaus seuraavana päivänä, kuivuserä sekoitettiin ylikuivan viljan kanssa varastosiiloon. Myös puukaasumittaus 2 jouduttiin keskeyttämään toimintavian takia, jolloin viljan kosteus oli 15,1 %. Kuivuserä jäähdytettiin ja kuivatusta jatkettiin seuraavana päivänä puukaasumittauksessa 3 saavuttaen viljan kosteuden 13,4 %. Puukaasumittauksessa 4 viljan kuivaus ja mittaus lopetettiin kun viljan kosteus oli varastointikelpoista (13,5 %). Mittausta olisi voinut laitteiston toiminnan puolesta jatkaa, mutta laitteiston korjausten, aikataulujen venymisen ja muutosten aiheuttaman väsymyksen takia, tutkijaryhmä päätti lopettaa mittaukset turvallisuussyistä.

Taulukossa 2 on esitetty kuivuserien alku- ja loppupainot ja kosteudet, loppukosteus, öljyn ja hakkeen kulutus. Puukaasumittaukset 2 ja 3 jouduttiin yhdistämään samaan kuivuserään, joten mittauksen 3 alkupainoa ei aikataulullisista syistä määritetty.

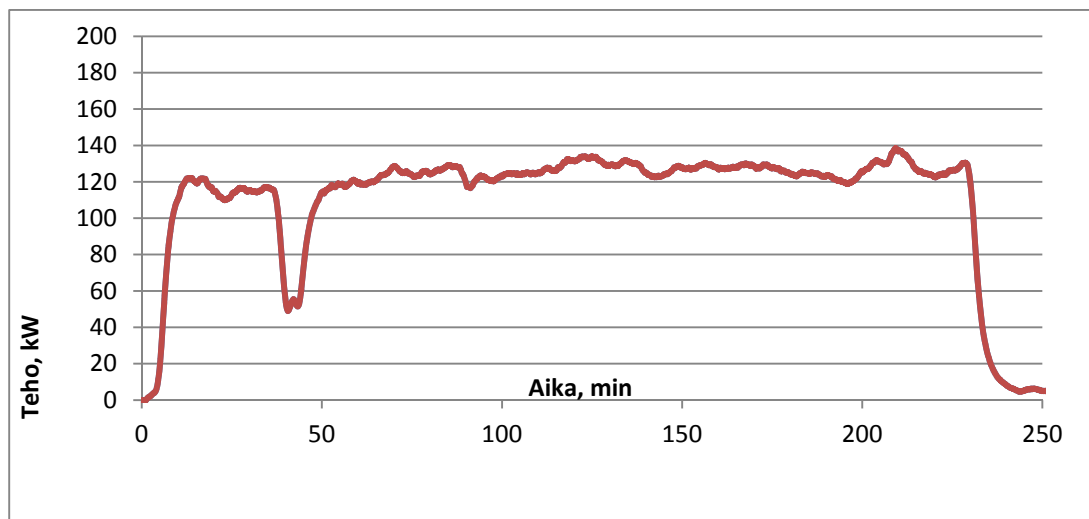
Taulukko 2. Kuivurimittausten eräpainot, viljan kostedat, vedenpoisto ja polttoaineen kulutusta koskevat tiedot.

Mittaus	Erän paino, kg			Viljan kosteus, %		Veden poisto kg	Roskat kg	Polttoaine/erä	
	alku	loppu	erotus	alku	loppu			öljy, l	hake, kg
Öljy1	11140	10730	410	15,4	12,9	279	132	57	
Öljy2	12010	11000	1010	18,5	13	661	349	120	
Puu1	12340	11700	640	16,4	14	296	344		160
Puu2-	12190			18,1	15,1	6			140
Puu 3		11550	640	15,1	13,4	573	-		210
Puu4	11290	10480	810	17,2	13,5	418	392		380

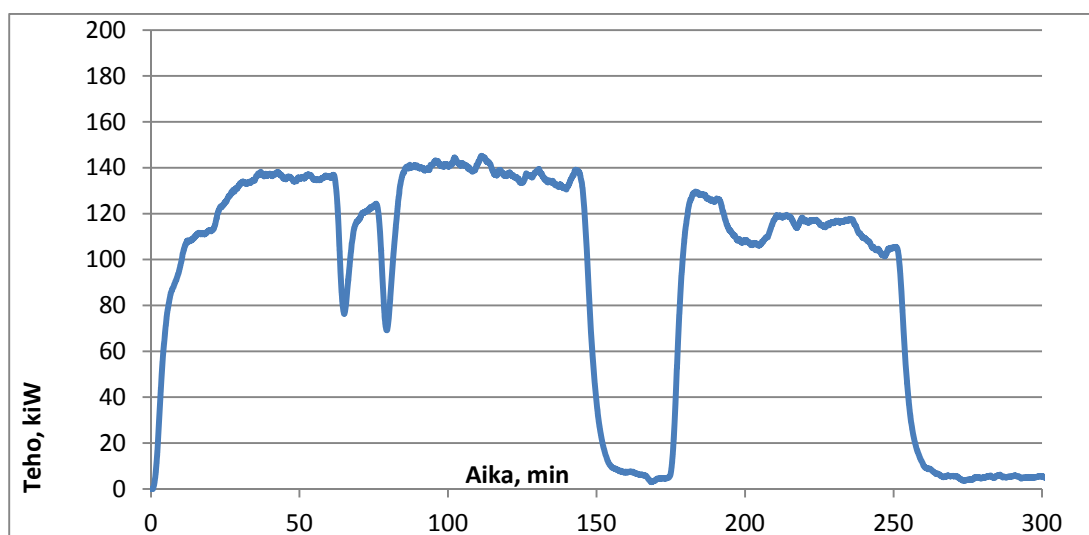
Kuvista 8–12 voidaan nähdä, että käytettäessä lämmönlähteenä polttoöljyä lämpöteho pysyy kohtuullisen vakaana koko kuivausjakson ajan. Puukaasua käytettäessä teho sen sijaan vaihtelee jonkin verran. Kuivauksen aikana oli myös jaksoja, joissa teho laski huomattavasti. Taulukossa 3 on esitetty kooste tehdyistä kokeista.



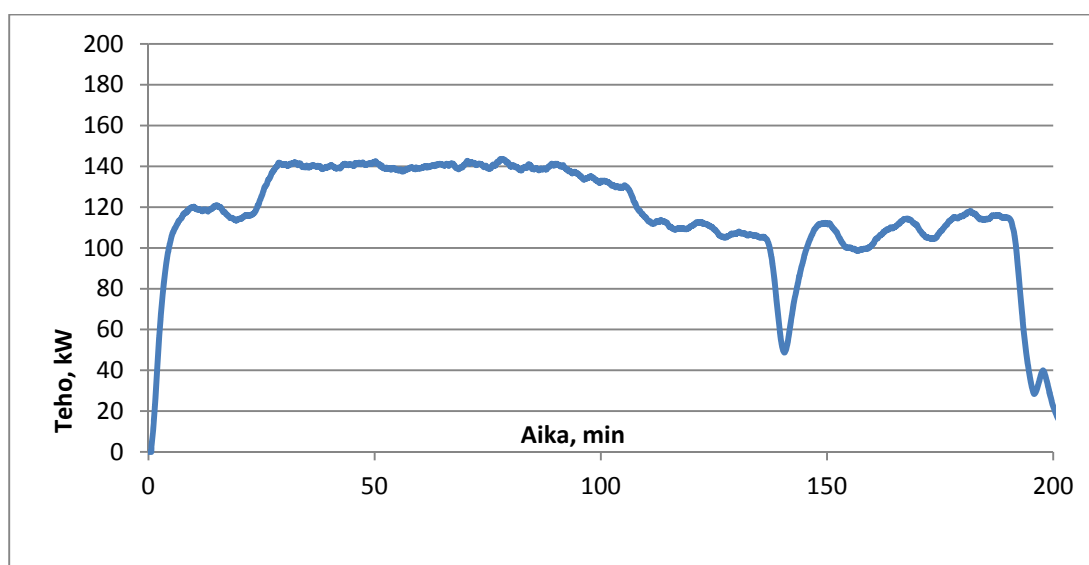
Kuva 8. Kahden minuutin keskiteho käytettäessä polttoöljyä.



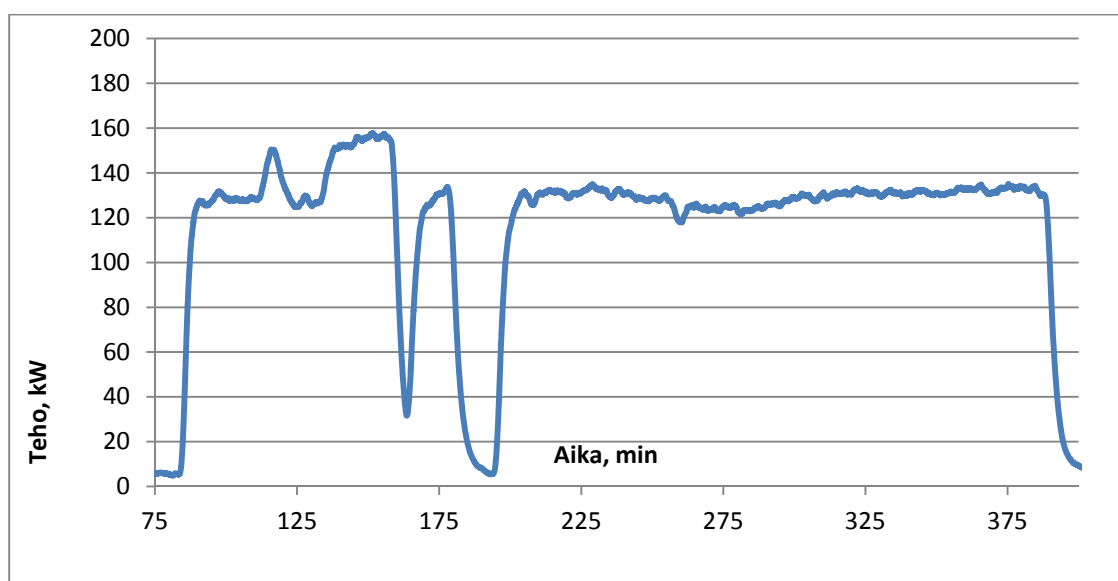
Kuva 9. Kahden minuutin keskiteho ajossa puukaasu 1.



Kuva 10. Kahden minuutin keskiteho ajossa puukaasu 2.



Kuva 11. Kahden minuutin keskiteho ajossa puukaasu 3.

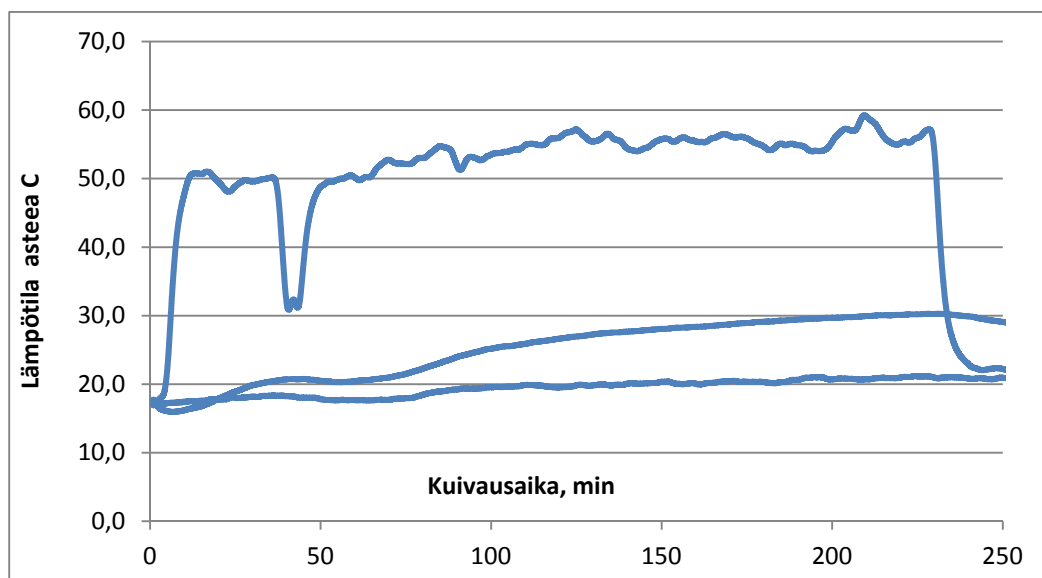


Kuva 12. Kahden minuutin keskiteho ajossa puukaasu 4.

Taulukko 3. Kooste tehdyistä kuivauskokeista.

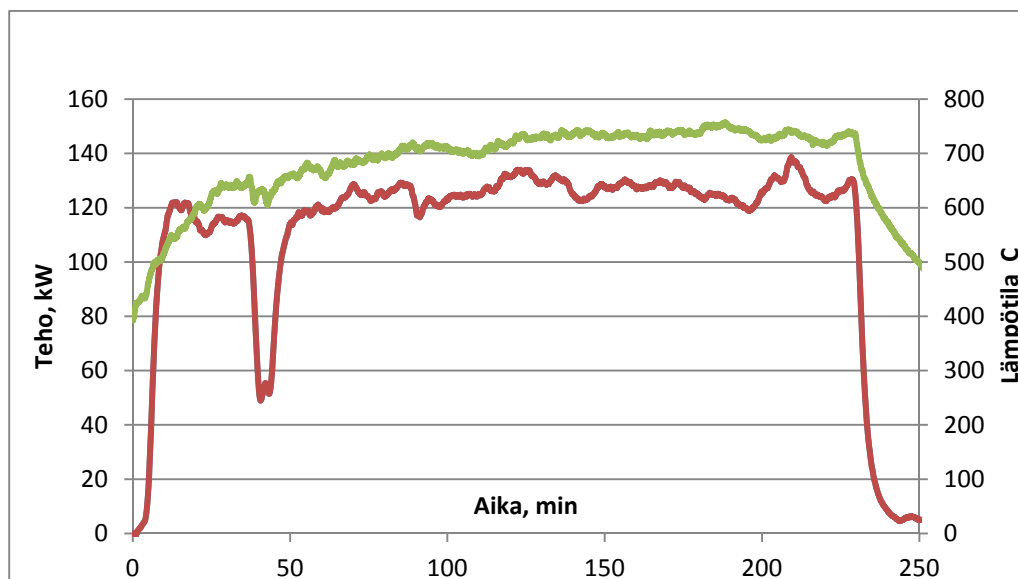
		Öljy1	Öljy2	Puu1	Puu2	Puu3	Puu4
Öljyä	l	60,4	104,5				
Haketta	kg			160	140	210	380
Polttoaineen energiasisältö	kWh	603,9	1044,5	553,2	485,5	728,3	1314,8
Ilmaan siirtynyt energia	kWh	505,6	858,3	467,0	476,8	394,3	639,1
Sähkön kulutus kuivauksen aikana	kWh	36,3	62,1	65,8	74,7	54,6	89,6
Hyötysuhde	%	79,0	77,6	75,4	83,5	50,4	45,5
Hakkeen kosteus	%			13,6	13,3	13,3	13,5
Sähkön osuus	%	6,7	6,8	12,3	13,5	12,2	12,3

Käytettäessä polttoaineena öljyä keskimääräinen energiahyötysuhde oli 78 % ja sähkön osuus kulutetusta energiasta 7 %. Puukaasulla vastaavat luvut olivat keskimäärin 64 % ja 13 %. Puukaasulla hyötysuhteen vaihtelu oli suuri. Kuvassa 13 on esitetty ensimmäisen puukuivauserän lämpötilat. Ylimmäinen käyrä on kuivausilma, keskimäinen kuivurista poistuva ilma ja alimmainen ulkoilma. Mittauksen perusteella kuivauslämpötilaa voitiin nostaa lähes 60 asteeseen. Samassa yhteydessä puukaasulaitteistoon ilmaantui ongelmia ja laitteisto jouduttiin ajamaan alas korjaustöitä varten.



Kuva 13. Kuivaus puukaasulla Erä 1.

Lämpötilamittausten avulla oli mahdollista tarkkailla puukaasulaitteiston toimivuutta ja säätää sen parametreja. Kuvassa 14 on esitetty miten kaasuttimen arinan lämpötila ja lämpöteho käyttäytyi mittauksen aikana. Arinan lämpötila on erittäin korkea, joten sen suojaukset kaupallisessa tuotteessa pitää rakentaa niin, että turvallisuusvaatimukset ja lainsäädäntö täyttyvät. Myös putkisto, jossa puukaasu virtaa lauhduttimelle, olisi suunniteltava niin, ettei käyttäjä altistu palovaaralle laitteiston käytön aikana.



Kuva 14. Kuivaus puukaasulla erän 1 lämpöteho ja arinan lämpötila. Kuvan vihreä käyrä kuvaa arinan lämpötilaa ja punainen laitteiston lämpötehoa tuloilmakanavasta mitattuna.

Vaikka puukaasulla tehdyissä kokeissa vaihtelu oli suuri ja vaikka laitteisto ei teholtaan (testikuivurissa) eikä säädettävyydeltään vastaa viljankuivauksen vaatimuksia, ovat tulokset kuitenkin lupaavia. Tehtyjen kokeiden perusteella ei voida sanoa, mikä on laitteiston hyötysuhde tai nimellisteho, ennen kuin havaitut ongelmat on saatu laitteistosta korjattua. Alihankkijan antamien ennakkotietojen perusteella laitteiston teho-odotukset olivat huomattavasti optimaalisemmat. Ensimmäisessä puukaasumittauksessa laitteisto näytti toimivan hyvin ja laitteiston käyttäjä halusikin nostaa laitteiston tehoa niin, että kuivatuslämpötila olisi ollut lähes öljymittauksen tasolla. Tässä

vaiheessa laitteistosta yritettiin saada liian suurta tehoa, joten osittain sen seurauksena laitteistoon tuli toimintahäiriöitä ja muita odottamattomia ongelmia.

Itse puukaasulaitteistoa pitäisi kehittää edelleen, että se toimii oman säätöjärjestelmän ohjaamana niin, että toimintaan tarvitsee puuttua ainoastaan polttoaineen lisäämiseksi ja hyvin vähäisten tarkastusten tekemiseksi. Sen jälkeen on tehtävä uusia kokeita laitteiston tehon, hyötysuhteen, säädettävyyden ja muiden, käyttökohteen vaatimusten edellyttämien, ominaisuuksien testaamiseksi.

Kun laitteisto on rakennettu toimintakuntoiseksi, on se mahdollista liittää kuivurin automatiikkaan, jolloin puukaasulaitteiston lämmöntuottoa ohjattaisiin kuivurin automatiikalla. Yhtenä ajatuksena olisi, että puukaasulaitteisto olisi niin sanotulla säästöliekillä viljan jäädytyksen ja kuivurin täytön ja tyhjennyksen ajan, jonka jälkeen sen tehoja olisi mahdollista nostaa kuivatuksen ajaksi.

Koska kokeissa ei saavutettu odotettua kuivaustulosta eikä yhtäjaksoiset kuivausjaksot olleet pitkiä, ei tekniikan taloudellista kannattavuutta voitu määrittää. Aikaisempien tutkimusten perusteella oman hakkeen tai palaturpeen käyttö olisi öljyä edullisempaa (laskenta taustana lämpökontti, jossa on stokerisyöttöinen ilmalämmitysuuni) öljyn hinnan ylittäessä 55–58 c/l (Lötjönen & Kassi 2010). Mahdollisten puukaasulaitteiston investointikustannusten pienempi osuus nostaisi kannattavuutta edelleen.

3.3. Kooste turvallisuustoimenpiteistä

Tutkimuksen ja mittausten aikana turvallisuuteen ja käyttöön liittyviä huomioita kirjattiin tutkijaryhmän voimin. Seuraavassa on esitetty tutkijaryhmän ehdotuksista, mitä laitteiston käytöstä ja soveltuvuudesta maatilamittakaavan käyttöön pitäisi ottaa huomioon:

- Siirrettävää laitteistoa varten kuivaamoalueelle vaaditaan murskekenttä, johon laitteiston asettaminen siirtolavalta olisi turvallista toteuttaa.
- Kuminen kaasuputki laitteistolta pannuhuoneeseen on suojattava mekaanisilta rasituksilta.
- Metallista kaasuputkea käytettäessä, mahdollinen räjähdys vaara on huomioitava putkiston suunnittelussa.
- Kaasun kondenssiovesi pitää poistaa ennen kuin kaasu johdetaan kaasuputkeen.
- Puukaasulaitteistolle asennettu virransyöttö on toteutettava lainsäädännön mukaisesti.
- Kuivurin pannuhuoneeseen, kuivaamorakennukseen ja laitteiston konttiin on asennettava häikä-/kaasuvaroittimet.
- Alkusammutuskalusto on sijoitettava puukaasulaitteiston läheisyyteen.
- Laitteiston sijoittamisessa on huomioitava pölyn aiheuttama palo-/räjähdysriski. Laitteisto olisi sijoitettava niin, ettei mm. esipuhdistimien ja kippauksen pöly ei kulkeutuisi laitteistoon.
- Käyttäjälle on esitettävä turvallisuus- ja toipumissuunnitelma laitteiston käytöstä tilanteissa, joissa mm. laitteistossa havaitaan tekninen ongelma tai sähköt katkeavat.
- Ulkopuolisten henkilöiden informointi (turvallisuus kyltit).
- Kuivurin ja puukaasulaitteiston automaation suunnittelussa pitää ottaa huomioon ongelmatilanteissa aiheutuma turvallisuusriski.

3.4. Puukaasun koostumus

Tuotetusta puukaasusta mitattiin häkä-, vety-, hiilidioksidi-, metaani-, happi- ja rikkivetypitoisuudet. Kaasu sisälsi keskimäärin häkää 22 %, vetyä 17 %, hiilidioksidia 11 %, metaania 2 % ja rikkivetyä 2000 ppm. Viimeisessä näytteessä happea mitattiin 6 %, muissa näytteissä happea ei ollut. Viimeisen näytteen oton aikana ilmaa pääsi virtaamaan laitteistoon, mikä alensi myös hieman vetypitoisuutta, viimeisen näytteen vety pitoisuus oli vain 12 %, kahdessa aikaisemmassa näytteessä pitoisuus oli 19,5 %.

3.5. Hiilen koostumus

Hiilen loppusijoitus ja soveltuvuus esimerkiksi maanparannusaineeksi määritettiin määrittämällä kaasutuksessa muodostuvasta puuhiilestä ravinnepitoisuudet, raskasmetallit, polyaromaattiset hiilivedyt (PAH) (taulukko 4). Ravinnepitoisuudet puupohjaisessa kaasutushiilessä olivat alhaisia. Fosforia hiilessä oli vain 4,3 mg kg⁻¹, eli alle puoli prosenttia. Tyypillisesti markkinoilla olevat fosforilannoitteen sisältävät fosforia useita prosentteja. Myös kokonaistypen määrä oli hyvin alhainen 0,17 %. Lisäksi on oletettavaa, että vain osa hiilen sisältämistä ravinteista on helppoliukoisessa muodossa.

Taulukko 4. Hiilijakeen kuningasveteen uuttuvat raskasmetallipitoisuudet, mg/kg_{kuiva-aine}

	Hg	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
Hiilijae	0,02	1,4	44	40	13	38	472
MMM, Asetus 24/11	1	1,5	300	600	100	100	1500

Raskasmetallien osalta pitoisuudet eivät ylittäneet Maa- ja Metsätalousministeriön asetuksen 24/11 raja-arvoja (Asetus lannoitevalmisteista). Kadmiumin pitoisuudet hiilessä olivat kuitenkin korkeat, mikä käytännössä rajoittaisi maatalouskäyttö levitysmäärien osalta. Hiilijae sisälsi kuitenkin suuria määriä PAH-yhdisteitä, yhteensä yli 8 g kg⁻¹. Myös erityisesti ympäristötutkimuksissa käytettävä EPA-PAH 16 yhdisteiden pitoisuus oli korkea 6,5 g kg⁻¹. Tulosten perusteella hiilijakeelle tulisi löytää muu käyttökohde kuin maatalouskäyttö. Vaihtoehtoista käyttökohdetta silmällä pitäen hiilijakeesta määritettiin myös lämpöarvo. Hiilen kalorimetrinen lämpöarvo oli verrattain korkea, 20,3 MJ/kg kuiva-ainetta. Vastaava kivihiilen lämpöarvo on noin 29 MJ/kg kuiva-ainetta. Tulosten perusteella hiilijakeen käyttö energiaksi voisi olla maatalouskäytölle yksi mahdollinen vaihtoehto.

3.6. Päästöt ilmaan

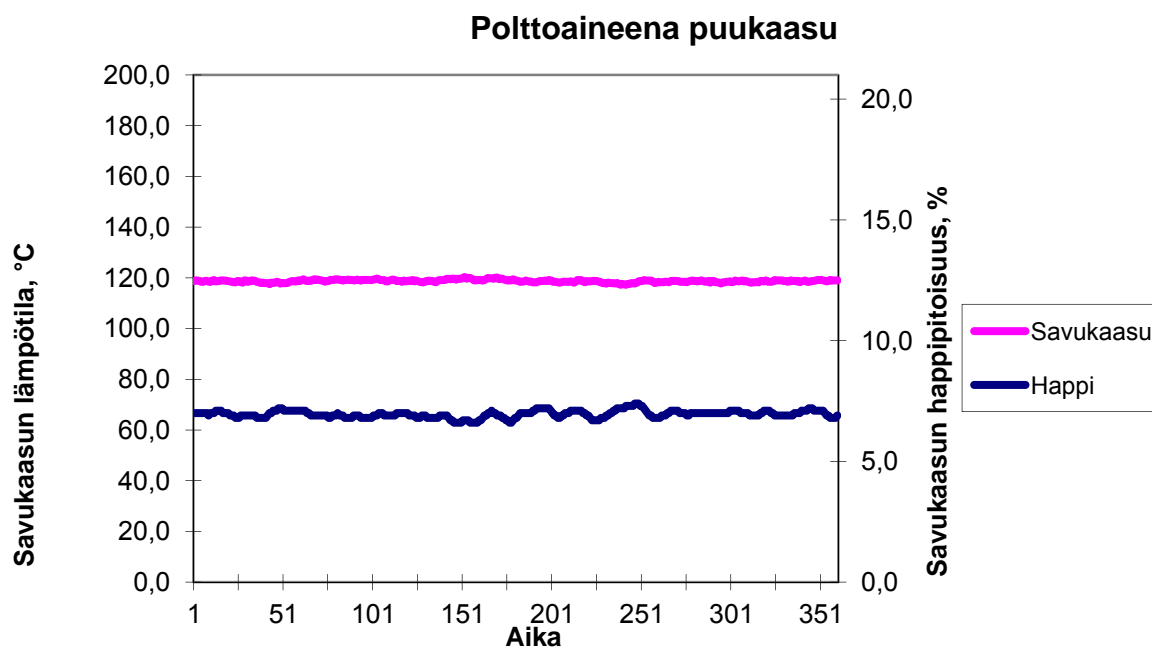
Polttokokeiden savukaasu mitattiin sekä puukaasulla että polttoöljyllä tehdyissä kokeissa (taulukko 5). Yhdisteiden pitoisuuksista laskettiin keskiarvot mittausjakson (30 min) ajalta. Hiukkasten massan mittauksessa päästiin puukaasulla alle 10 mg/m³. Tämä on asetettu ylärajaksi, mikäli esimerkiksi siipikarjan lantaa aiotaan polttaa. Öljyllä päästään hyvin pieniin hiukkasten massoihin, mikäli säädöt ovat kohdallaan. Sen sijaan tämä mittaus ei kerro mitään hiukkasten kokojakaumasta. Savukaasujen häikäpitoisuus kuvaa hyvin palamisen tasoa. Joissakin tehdyissä kokeissa häkää oli niin vähän, ettei mittarin erottelukyky enää riittänyt.

Yleensä puun arinapoltossa typen oksidit jäävät alle sadan ppm. Puukaasulla ne kuitenkin nousivat tietyillä säädöillä yli 150 ppm. Tämä johtuu luultavasti kaasuttimen hiilikerroksen korkeasta lämpötilasta. Toisaalta korkea lämpötila varmistaa puukaasun alhaisen tervapitoisuuden. Palamishyötysuhde oli kokeissa molemmilla polttoaineilla korkea; noin 95 %.

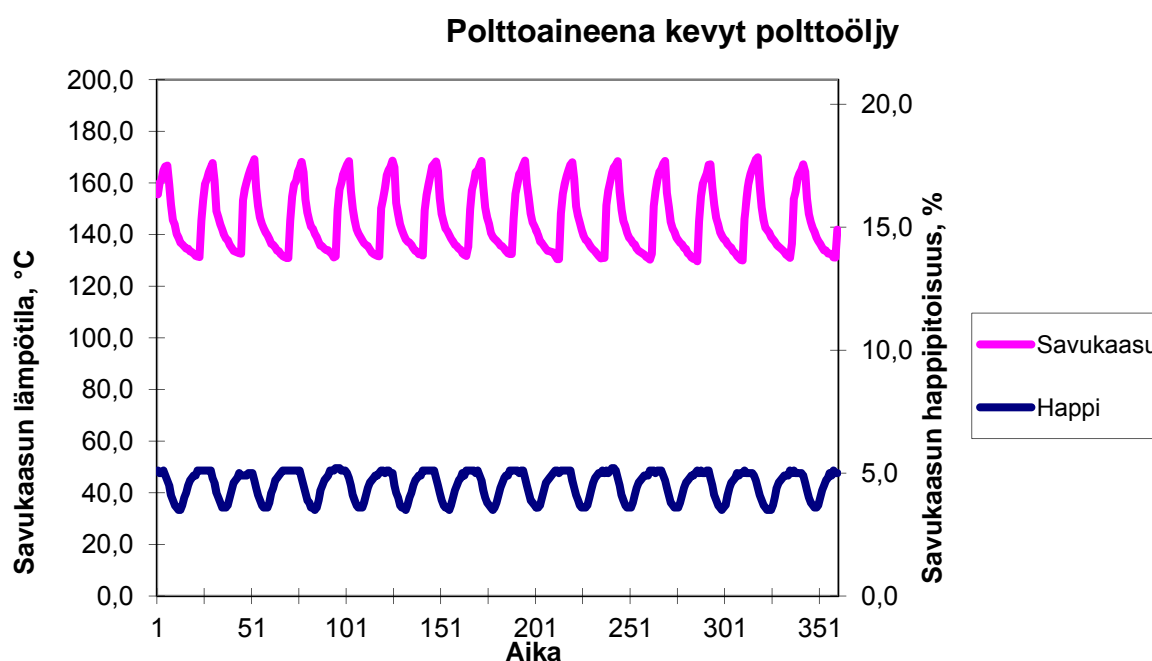
Taulukko 5. Hakkeesta tehdyn puukaasun ja öljyn poltossa syntyvien savukaasujen pitoisuudet.

	Kosteus, %	Teho il-massa, kW	Hiukkaset, mg/m ³	CO, ppm	NO, ppm	NO ₂ , ppm	O ₂ , %	T _s , °C	Palamishyötysuhde, %
Hake	20	131	9,1	0	152	2,4	7,0	119	95
Öljy	0	177	0,3	4	76	0,5	4,5	145	94

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty taulukon 4 kokeiden kulku savukaasun lämpötilan ja savukaasun happipitoisuuden mukaan 30 minuutin ajanjaksolla. Kuvasta 15 huomataan, että kaasun muodostuminen ja palaminen on hyvin tasaista kaasuttimen ollessa jatkuvuustilassa. Kuvassa 16 näkyy hyvin kevytöljypolttimen kaksiliekkisyys. Suuremmalla teholla savukaasun lämpötila nousee ja savukaasujen happipitoisuus laskee. Häkä pysyy kuitenkin kokoajan lähes nollassa.



Kuva 15. Käytettäessä puukaasua polttoaineena savukaasujen lämpötila ja happipitoisuus pysyivät vakaina. Kuvassa on esitetty kokeen kulku 30 minuutin ajanjaksolta.



Kuva 16. Kaksiliekkipolttimen teho vaihtelee, mikä näkyy savukaasun lämpötilassa ja savukaasujen happipitoisuudessa.

Säädöillä on suuri vaikutus päästöihin. Parhaimmillaan voitiin löytää hetkellisesti sellaiset säädöt, että happipitoisuus ja häkäpitoisuus olivat lähes nolla. Suurimman osan ajasta kaasutin toimi kuitenkin siten, että happipitoisuus oli 5 prosentin luokkaa. Taulukossa 6 on esitetty osa tehdyistä kokeista, joissa kokeiltiin eri säätöjen toimivuutta. Yleisesti voidaan nähdä, että hiukkasten massa pysyi kauttaaltaan pienenä. Puukaasun polttokokeen aikana mitattiin savukaasujen nopeudeksi noin 3,2 m/s. Savuhormin halkaisija oli 200 mm. Mittaus tehtiin pitot–putkella, joten tulos ei ole kovin tarkka.

Taulukko 6. Neljän hakkeen kaasutuskokeen savukaasujen arvoja, kun kaasuttimen eri säätöjä testattiin.

Kosteus	Hiukkaset	CO	NO	NO ₂	O ₂	T _s	Palamishyötysuhde
%	mg/m ³	ppm	ppm	ppm	%	°C	%
20	6,8	13	130	4,7	5,0	113	96
20	3,3	77	67	3,6	5,2	117	95
17	1,9	180	34	15	12	98	94
17	2,1	6	88	11	7,5	122	94

Tehdyt mittaukset osoittivat puukaasun polton pienet hiukkaspitoisuudet verrattuna perinteiseen arinapolttoon. Kokeissa päästiin alle 10 mg/m³ hiukkaspäästöihin. Häkäpäästö oli joissakin kokeissa lähes nolla. Savukaasujen happipitoisuus oli hyvin pieni mikä tarkoittaa korkeaa palamislämpötilaa ja siten hyvää palamishyötysuhdetta. Tämä edellyttää tietenkin, että kattila ja poltin on oikein mitoitettu keskenään. NO päästö oli joissakin kokeissa suurempi kuin perinteisellä arinapoltolla. Tämä johtuu kaasuttimen hiilipatjan korkeasta lämpötilasta. Toisaalta korkea lämpö varmistaa syntyvän kaasun paremman laadun koska esimerkiksi tervapitoisuus laskee.

Tehdyissä kokeissa savukaasupäästöt vaihtelivat keskimäärin seuraavasti:

- Hiukkaspäästö: 2–9 mg/m³
- Häkäpäästö: 0–245 mg/m³
- NO-päästö: 40–180 mg/m³
- Palamishyötysuhde oli 94–96 %

4. Jatkotutkimustarpeet

Kokeiden perusteella tutkimusryhmä esittää seuraavia jatkotutkimustarpeita:

- Laitteiston pitkäaikainen toimivuus varmennettava
- Huoltotarve selvitettävä
- Kasvatettava laitteiston tehoa viljankuivausta varten
- Uusien käyttökohteiden (esimerkiksi kasvihuoneet) kartoittaminen
- Kaasufraktion monipuolisen käytön selvittäminen (esim. CO₂ hyötykäyttö)
- Nestefraktion (lauhdutettavan nesteen) loppusijoitusmahdollisuudet käyttökohteessa
- Muodostuvan hiilen loppusijoitus / jatkokäyttö käyttökohteessa

5. Johtopäätökset

Mittausten perusteella, käytettäessä polttoaineena öljyä energiahyötysuhde oli 78 % ja sähkön osuus kulutetusta energiasta 7 %. Puukaasulla vastaavasti energiahyötysuhde oli 64 % ja sähkön osuus kulutetusta energiasta 13 %. Puukaasulaitteiston toiminnan epävarmuus aiheutti todennäköisesti eri mittausten hyötysuhteisiin vaihtelua. Tämän tutkimuksen perusteella ei voidakaan sanoa, mikä toimivan laitteiston lopullinen hyötysuhde tulisi olemaan. Jatkotutkimuksissa laitteiston toiminta ja tekniikka pitää saada tasolle, jotta yhtäjaksoinen mittaus olisi mahdollista ja mittaukset olisi mahdollista toistaa riittävän usein.

Vaikka puukaasulla tehdyissä kokeissa vaihtelu oli suuri ja vaikka laitteisto ei teholtaan eikä säädettävyydeltään vastaa viljankuivauksen vaatimuksia, ovat tulokset kuitenkin lupaavia. Laitteistoa pitäisi kehittää edelleen niin, että se toimii oman säätöjärjestelmän ohjaamana ja että toimintaan tarvitsee puuttua ainoastaan polttoaineen lisäämiseksi ja hyvin vähäisten tarkastusten tekemiseksi.

Puukaasun soveltuvuutta viljankuivurin lämmönlähteeksi voi tarkastella monesta näkökulmasta, joista yksi on taloudellisuus. Puukaasutuksella voidaan saada huomattavia säästöjä, jos energia (hake) saadaan omasta metsästä. Tällöin tilalla on oltava mahdollisuus varastoida polttoainetta sekä mahdollisuus polttoaineen koneelliselle käsittelylle. Lisäksi on huomioitava, että viljan viljelyssä korjuukausi on kiireistä aikaa. Puinti, viljankuljetus kuivaamoon, viljan kuivaus ja kuivan viljan siirto varastoon ovat työvaiheita, joista vastaa usein yksi ja sama ihminen. Valittaessa kuivuriuunin lämmönlähdettä kuivaukseen käytetty työmenekki ja kuivauksen luotettavuus saattavat hyvinkin kääntää vaakakupin varman, mutta kalliimman vaihtoehdon puoleen. Kaasukuivausta edelleen kehitettäessä huomiota on kiinnitettävä varmatoimisuuteen ja kuivausaikaisen työmenekin minimoimiseen. Koe-tulosten perusteella polttotekniikka, ainakin lyhyillä toimintajakoilla, näyttää toimivan varsin hyvin.

Puukaasulaitteistosta hyötyisivät erityisesti sellaiset tilat, jossa on mahdollisuus hyödyntää tilan omaa haketta. Lisämahdollisuuksia tuo laitteiston liikuteltavuus, mikä mahdollistaa energian tuotannon muuhun tarkoitukseen, jos niitä tilalla on. Liikuteltavuus mahdollistaa myös sellaisen liiketoiminnan, jossa maatila ostaa viljan kuivauksen ulkopuoliselta yrittäjältä. Puintikauden ollessa kuitenkin lyhyt, edellyttää tämä toimintatapa sitä, että yrittäjällä on laitteistolle käyttöä puintikauden ulkopuolellakin. Laitteiston liikuteltavuuden lisäksi etua tuo, että kaasua voidaan jakaa myös esimerkiksi tuotantorakennusten lämmitysjärjestelmiin.

Kirjallisuus

- Ahokas, J. 2012. Viljan kuivatuksessa säästöjä nopeasti. <http://www.energia-akademie.fi/attachments/article/48/Viljan%20kuivatuksessa%20s%C3%A4%C3%A4st%C3%B6j%C3%A4%20nopeasti.pdf>
- Karelia 2014. Viljankuivaus ja siihen liittyvät energianäkökulmat. https://www.proagria.fi/sites/default/files/attachment/kilpelainen_viljankuivauksen_teorjaa.pdf
- Koskiniemi 2009. Viljankuivaus kotimaisella polttoaineella—opas. http://www.bioenergiatieto.fi/default/?__EVIA_WYSIWYG_FILE=4550&name=file
- Lötjönen, T. & Kässi, P. Energiakustannusten säästö viljankuivauksessa. Maataloustieteenpäivät 2010. <http://www.smts.fi/jul2010/poste2010/180.pdf>



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Viikinkaari 4
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000