

Pyy Jussi-Pekka

Purun, hakkeen, kauran oljen ja ruokohelven pelletöityminen

Purun, hakkeen, kauran oljen ja ruokohelven pelletöityminen

Jussi-Pekka Pyy
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma, yritystoiminnan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Jussi-Pekka Pyy

Opinnäytetyön nimi: Purun, hakkeen, kauran oljen ja ruokohelven pelletöityminen

Työn ohjaaja(t): Anu Hilli, Ritva Impola

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: kevät 2014

Sivumäärä: 63

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää miten puru, hake, kauran olki ja ruokohelvi soveltuvat pelletöintiin ja millaiset seokset ovat parhaita näillä raaka-aineilla. Pellettien ominaisuuksista tutkittiin irtotiheyttä, kosteuspitoisuutta, mekaanista kestävyyttä, tuhkapitoisuutta sekä lämpöarvoa. Tutkittavia seoksia oli mukana kaikkiaan 30 kappaletta. Työn toimeksiantaja oli Oulun ammattikorkeakoulun Luonnonvara-alan yksikön Ekopelletti T&K –hanke.

Pelletöinti- ja polttokokeet oli tehty opinnäytetyön ulkopuolella Ekopelletti T&K –hankkeen puitteissa, joten opinnäytetyöhön kuului ainoastaan mittauksen analysointi. Käytettävissä oli pelletöinti- ja polttokokeista saadut laajat tulokset.

Jokaista ominaisuutta tarkasteltiin erikseen. Tarkastelu tehtiin pylväsdiagrammeissa, joissa osaa ominaisuuksista jouduttiin tarkastelemaan raaka-aineittain pellettien runsaan määrän vuoksi. Näistä diagrammeista voitiin verrata eri seoksia keskenään ja löytää helposti tarkasteltavaa raaka-ainetta sisältäneistä pelleteistä paras ja huonoin seos. Lopuksi kaikkien pellettien tuloksia verrattiin vielä Suomen standardisointiliiton puupelleteille määritelyihin laatuvaatimuksiin.

Tuloksista havaittiin, että puru on tutkituista raaka-aineista selvästi paras. Varsinkin poltto-ominaisuuksiltaan puru on ylivoimainen muihin raaka-aineisiin verrattuna. Hakepelletit kärsivät heikosta mekaanisesta kestävydestä sekä irtotiheydestä. Poltto-ominaisuuksiltaan hakepelletit ovat lähimpänä purua. Ruokohelpipellettien mekaaninen kestävyys vaihteli kokeen heikoimmasta kokeen parhaaksi. Myös tuhkapitoisuus oli ruokohelpipelleteillä heikohko. Sen sijaan muilta ominaisuuksiltaan ruokohelpipelletit olivat hyviä. Kokeen raaka-aineista kauran olki oli selvästi huonoin pelletöinnin raaka-aine, sillä yksinään se ei menestynyt oikein missään ominaisuudessa.

Kahden eri raaka-aineen seoksista paras oli hakkeen ja ruokohelven seos. Tässä seoksessa hake ja ruokohelvi saivat usein parempia tuloksia kuin yksinään. Seos sai myös lähes purun veroisia tuloksia ominaisuuksistaan, joten se vaikuttaisi olevan erittäin toimiva seos. Kauran olki toimi parhaiten seoksena purun tai hakkeen kanssa, kun seoksesta suurin osa on jotain muuta kuin kauran olkea.

Asiasanat: pelletit, bioenergia, puru, hake, ruokohelvi, olki

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Agricultural and Rural Industries

Author: Jussi-Pekka Pyy

Title of thesis: Pelletizing of sawdust, wood chips, oat's straw and reed canary grass

Supervisors: Anu Hilli, Ritva Imppola

Term and year when thesis was submitted: Spring 2014

Number of pages: 63

The objective of thesis was to find out how sawdust, wood chips, oat's straw and reed canary grass are suitable for pelletizing and what kind of mixtures work best with these materials. The properties that were studied from pellets were bulk density, moisture content, mechanical strength, ash content and calorific value. There were 30 mixtures to be studied. The subscriber of this thesis was Oulu University of Applied Sciences School of Renewable Natural Resources EkoPelletti T&K-project.

The work included only the analysis of the measurements. Pelletizing and combustion tests were made outside of this thesis in EkoPelletti T&K-project. Extensive results of pelletizing and combustion experiments were available to be used in this thesis.

Every feature were examined separately. Examination was done in bar charts, where some of the features had to be examined by raw materials due to large amount of pellets. From these diagrams different mixtures could be compared to each other and it's easy to find the best and the worst mixture from the diagrams. Finally all the pellet test results were compared to Finnish standards of wood pellet's quality standards.

The results showed that sawdust is by far the best of the raw materials that were studied. In particular the combustion characteristics of saw dust is superior compared to other raw materials. Pellets that were made of wood chips suffered from weak mechanical strength and weak bulk density. By combustion characteristics wood chip pellets were almost as good as saw dust. Pellets made of reed canary grass had lot of variation in mechanical strength as it had the worst and the best mechanical strength. Reed canary grass pellets also had high ash content. Instead the other characteristics of pellets made of reed canary grass were good. The worst pellet of this test was oat's straw because when pellet included only straw it wasn't good at any property.

The best mixture that included two raw materials was wood chip's and reed canary grass's mixture. In this mixture wood chip and reed canary grass gained better results than what they had when they were the only raw material. This mixture also got almost as good results as saw dust so it's a very good mixture. Oat's straw worked best in mixture with saw dust or wood chips, when most of the mixture was something else than oat's straw.

Keywords: Pellets, Bioenergy, Sawdust, Wood chips, Straw, Reed canary grass

SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	7
2 POLTTOAINEPELLETIT JA NIIDEN TUOTANTO	9
2.1 Pelletit	9
2.2 Pelletin tuotanto Suomessa ja naapurimaissa	10
2.3 Pellettien raaka-aineet	11
2.3.1 Puru	11
2.3.2 Hake	12
2.3.3 Kauran olki.....	13
2.3.4 Ruokohelppi.....	14
3 AINEISTO JA MENETELMÄT	16
3.1 Raaka-aineet ja raaka-aineseokset.....	16
3.2 Pelletöintilaitteisto	18
3.3 Pellettien määrytykset	19
3.3.1 Raaka-aineen määrytykset	20
3.3.2 Pellettien irtotiheys.....	20
3.3.3 Kosteuspitoisuus.....	21
3.3.4 Mekaaninen kestävyys.....	22
3.4 Polttokoe ja polttokokeen määrytykset.....	23
3.4.1 Lämpöarvo	24
3.4.2 Tuhkapitoisuus.....	27
4 TULOKSET	28
4.1 Pellettien irtotiheys	28
4.2 Kosteuspitoisuus	32
4.3 Mekaaninen kestävyys.....	37

4.4 Ylempi lämpöarvo	41
4.5 Tuhkapitoisuus	45
4.6 Pelletöinnin energiankulutus ja pelletöintiin kulunut aika	47
5 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	49
5.1 Tulosten tarkastelu	49
5.1.1 Irtotiheys, kosteus ja mekaaninen kestävyys	50
5.1.2 Tuhkapitoisuus ja tehollinen lämpöarvo	52
5.2 Johtopäätökset	55
6 POHDINTA	57
LÄHTEET	58

1 JOHDANTO

Euroopan unionin (EU) tavoitteena on nostaa uusiutuvan energian osuus 20 %:iin EU:n energian kokonaiskulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Vuonna 2030 uusiutuvan energian osuus EU:n alueella pitäisi olla jo vähintään 27 %. Suomen tulee EU-komission ehdotuksen mukaan nostaa uusiutuvan energian osuus 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä, joten lisäysvelvoite on 9,5 prosenttiyksikköä vuoden 2005 tasosta. (Europa 2014, hakupäivä 8.4.2014; Motiva 2014a, hakupäivä 8.4.2014; Motiva 2014b, hakupäivä 8.4.2014.)

Vuonna 2005 EU:ssa tuotettujen uusiutuvien energianlähteiden osuudet jakaantuivat seuraavasti: biomassa 66,1 %, vesivoima 22,2 %, tuulivoima 5,5 %, geoterminen energia 5,5 % sekä aurinkoenergia 0,7 %. Suurimpaan uusiutuvien energianlähteiden luokkaan biomassaan kuuluvat muun muassa puu sekä peltokasvit. (Europa 2007, hakupäivä 8.4.2014.)

Valtaosa Suomessa käytettävästä uusiutuvasta energiasta tuotetaan puuperäisistä raaka-aineista. Suuri osa puuenergiasta tuotetaan hyödyntämällä puunjalostusteollisuuden sivuvirtoja, kuten kuorta ja sahanpurua. Näiden ohella puuenergiaa tuotetaan suoraan metsästä korjattavasta energiapuusta, josta voidaan valmistaa metsähaketta. (Motiva 2014c, hakupäivä 8.4.2014.) Peltokasveista energiantuotantoon soveltuvat kuivat selluloosapitoiset peltobiomassat, kuten ruokohelpi ja viljojen olki. Ne soveltuvat polttoon sellaisenaan tai muuhun polttoaineeseen sekoitettuna. (Motiva 2014d, hakupäivä 8.4.2014.)

Niin puuperäisten raaka-aineiden kuin peltobiomassojenkin käsittelyä voidaan helpottaa ja kuljetuskustannuksia alentaa puristamalla ne pelleteiksi. Pelleteissä raaka-aine on puristettu tiiviiksi paketiiksi, jolloin niiden energiasisältö on korkeampi kuin irtotavaralla. Pellettejä on perinteisesti valmistettu puuperäisistä raaka-aineista, kuten sahanpurusta ja kutterinpurusta.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään selvittämään uusien materiaalien soveltuvuutta pelletointiin. Opinnäytetyössä käsiteltävät raaka-aineet ovat puru,

hake, kauran olki sekä ruokohelmi. Nämä raaka-aineet ovat tavanomaisia energian tuotantoon käytettyjä maataloustuotteita. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää millaisia näistä raaka-aineista valmistetut pelletit ovat ja miten näistä raaka-aineista valmistetut pelletit soveltuvat polttoon.

Opinnäytetyön tilaajana toimi Oulun ammattikorkeakoulun Luonnonvara-alan yksikön Ekopelletti T&K –hanke. Hankkeessa kehitetään maatilamittakaavan pelletöinnin teknisiä ja taloudellisia ratkaisuja, selvitetään uusien materiaalien soveltuvuutta pellettien raaka-aineeksi ja selvitetään hajautetun pellettituotannon mahdollisuuksia.

2 POLTTOAINEPELLETIT JA NIIDEN TUOTANTO

2.1 Pelletit

Pelletti tarkoittaa pientä pyöreää massaa, joka on puristettu pallomaiseen tai sylinterimäiseen muotoon. Pelleteillä on erilaisia käyttötarkoituksia esimerkiksi rautamalmista valmistetut pelletit ovat raudan tuotannon alustavia tuotteita ja eläinten rehuksi valmistetut pelletit helpottavat rehujen käsittelyä. Yksi merkittävimmistä pelletin käyttötarkoituksista on kuitenkin energiantuotanto. (Obernberger & Thek 2010, 5-6)

Polttoaineeksi käytettävä pelletti on kiinteä, tasalaatuinen, biomassasta valmistettu kappale, jolla on alhainen kosteuspitoisuus, suuri energiatiheys ja yhdenmukainen sylinterimäinen muoto. Pääasiassa polttoainepelletin raaka-aineena käytetään kutteripurua, sahanpurua ja hiontapölyä, jotka ovat puusepän ja sahateollisuuden sivutuotteita. Tästä hienonnetusta puumassasta puristetaan pieniä tiiviitä sylintereitä. Pelleteissä puuenergia on hyvin tiiviissä muodossa, sillä yksi kuutio pellettejä sisältää saman energiamäärän kuin 300-330 litraa kevyttä polttoöljyä. (Motiva 2011, hakupäivä 11.12.2013.)

Pelletöintiin käytettävien raaka-aineiden valikoima kasvaa jatkuvasti. Esimerkiksi muovin, turpeen ja sanomalehden pelletöityvyyttä on tutkittu oljen ruokohelven, hakkeen ja purun ohella. Monesti ongelmaksi muodostuu eri materiaalien erilainen käyttäytyminen pelletöinnissä ja poltossa. Pelletöinnissä ongelmaksi voi muodostua aineen murentuminen tai muuten huono pelletöityminen. Poltossa ongelmaksi muodostuu usein runsas tuhkan muodostus, joka aiheuttaa ongelmia varsinkin pienempiä polttokattiloita käytettäessä. (Kukkonen 2013, hakupäivä 18.12.2013.)

2.2 Pelletin tuotanto Suomessa ja naapurimaissa

Suomessa puupellettiä on tuotettu 1990-luvun lopulta alkaen. Suomessa on noin 27 toiminnassa olevaa pellettitehdasta, jotka sijoittuvat raaka-aineen saannin ja asiakkaiden kannalta otollisiin paikkoihin. Pelletin tuotantoa ei tueta valtion varoin, vaan tuotanto toimii markkinaehtoisesti ja myynnistä maksetaan veroa yleisen arvonlisäverokannan mukaisesti. (Pellettienergia 2013, hakupäivä 11.12.2013.)

Vuonna 2012 Suomessa tuotettiin noin 252 000 tonnia puupellettiä, mikä on 18 % vähemmän kuin vuonna 2011. Vuoden 2012 tuotantomäärä oli pienin sitten vuoden 2005. Eniten puupellettejä tuotettiin vuonna 2008, jolloin niitä tuotettiin 373 000 tonnia. Suomessa pellettilämmitystä käyttää yli 26 000 pientaloa sekä yli tuhat suurempaa kohdetta. (Ylitalo 2013, hakupäivä 16.12.2013; Pellettienergia 2013, hakupäivä 11.12.2013.)

Pelletin käyttö lämmitysmuotona ei ole Suomessa lähtenyt toivotunlaiseen nousuun. Osasyys voidaan mainita omakotiasuntojen uudet lämmitysmuodot: maalämpö ja ilmalämpöpumppu, jotka mielletään pellettilämmitysjärjestelmää vaivattomammiksi. Myös sähkölämmitys pitää pintansa, sillä Suomessa sähkö on halpaa verrattuna moniin muihin Euroopan maihin. Lisäksi pellettilämmitys vaatii suhteellisen korkeat investoinnit mikä myös osaltaan karkottaa asiakkaita muihin lämmitysjärjestelmiin. (Pääsky 2011, hakupäivä 23.1.2014; Mäntyranta 2011, hakupäivä 23.1.2014.)

Vuonna 2012 ulkomaille vietiin puupellettejä 61 000 tonnia, joka on 55 % vähemmän kuin vuonna 2011. Melkein kaikki ulkomaille viedyt pelletit menivät Ruotsiin ja Tanskaan. Puupellettien tuonti ulkomailta kasvoi 28 000 tonniin, joka on kaksi kertaa edellisvuotta enemmän. Kaksi kolmasosaa tuli Venäjältä ja loput pääosin Latviasta. (Ylitalo 2013, hakupäivä 16.12.2013.)

Ruotsi on yksi maailman suurimpia puupelletin käyttäjiä. Vuonna 2008 120 000 kotitaloutta käytti pellettikattilaa ja lisäksi 20 000 kotitaloutta omisti pellettitakan. Lisäksi Ruotsissa on käytössä noin 4000 keskisuurta pellettikattilaa. Kokonaisuudessaan Ruotsin puupellettien kulutus oli vuonna 2008 1,85

miljoonaa tonnia, josta tuotetaan itse noin 1,4 miljoonaa tonnia. (Pelletsatlas 2014, hakupäivä 23.1.2014.) Myös Tanskassa puupellettejä käytetään runsaasti lämmitykseen. 2000-luvun alkupuolella Tanskan 200 000 tonnin tuotanto pystyi kattamaan puolet tarpeesta, mutta nykyisin tuotanto vähenee raaka-aineen saatavuuden vuoksi. Tämän vuoksi Tanskaan tuodaan paljon pellettejä ulkomailta. (Pelletsatlas 2014, hakupäivä 23.1.2014.)

Baltian maat ovat saavuttaneet hyvän aseman pellettimarkkinoilla, koska niiden pinta-alasta noin puolet on metsää, työvoima on halpaa, energianhinta on matala ja verot ovat pienet. Näiden syiden vuoksi ulkomaiset yritykset perustavat pellettitehtaita Baltian maihin. Myös Suomeen tuodaan paljon pellettiä Latviasta. (Muiste & Habicht 2009, hakupäivä 29.1.2014.)

Vuonna 2011 Venäjän pellettituotanto oli yli miljoona tonnia, jolla Venäjä on maailman viidenneksi suurin pelletin tuottaja Ruotsin, Saksan, Kanadan ja Yhdysvaltojen jälkeen. Suurin osa Venäjällä tuotetuista pelleteistä menee ulkomaan vientiin, ja Venäjä onkin samalla yksi tärkeimmistä puupelletin toimittajista Euroopan markkinoilla. Vain noin 15-30 % Venäjällä tuotetuista pelleteistä käytetään kotimarkkinoilla. (Metla 2012, hakupäivä 30.1.2014; Rakitova & Ovsyanko 2009, hakupäivä 30.1.2014.)

2.3 Pellettien raaka-aineet

2.3.1 Puru

Purulla tarkoitetaan sahanpurua ja kutterinpurua. Sahanpurua saadaan puutavaran sahauksen sivutuotteena. Kutterinpuru on konehöyläyksessä syntyvää puujätettä. Yleensä sahanpuru on märkää ja ilmavaa ja sen kosteuspitoisuus voi vaihdella huomattavasti ilmakeivästä 70 %:iin. Kutterinpuru on yleensä niin kuivaa ja kevyttä, että sitä ei voida polttaa sellaisenaan vaan se on sekoitettava muihin raskaampiin ja märempiin polttoaineisiin. (Alakangas 2000, 69-70.)

Sahan- ja kutterinpuru ovat pellettien yleisimmät raaka-aineet ja ne myös soveltuvat pelletöintiin kaikkein parhaiten. Esikuivattua kutterinpurua pidetään parhaana raaka-aineena mutta sen saatavuus on sahanpurua heikompaa. Myös polttolaitteistot on yleensä suunniteltu puupohjaisille pelleteille. (Aalto 2013, hakupäivä 24.1.2014.)

2.3.2 Hake

Hake on puuta, joka on haketettu pieniksi kappaleiksi. Hakepalan tavoitepituus on yleensä 30-40 mm. Tavallisesti haketta käytetään rakennusten lämmityskattiloissa, lämpölaitoksilla ja teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksilla. (Alakangas 2000, 48.)

Hakkeen raaka-aineena käytetään teollisuuden ainespuuta, ainespuuksi kelpaamatonta rankaa, hakkuutähdettä, raivaus- ja taimikonhoitopuuta, kanto- ja juuripuuta, sahaustähdettä ja muita teollisuuden kiinteitä sivutuotetähteitä, puuperäisiä rakennusjätteitä ja kierrätyspuuta. Puun hienontaminen voidaan tehdä joko terävillä terillä hakettamalla tai murskaamalla tylpillä, iskevillä terillä. (Kuitto 2005, 9.)

Polttohake on hakkurilla valmistettua polttoainetta. Yleensä polttohake valmistetaan puuraaka-aineesta, joka ei mitoiltaan tai laatuominaisuuksiltaan kelpaa teollisuuden käyttöön. Tällaista puuraaka-ainetta ovat muun muassa alle ainespuukokoiset tai laadultaan vajaat rungonosat, oksat neulasineen ja lehtineen sekä kanto- ja juuripuu. Lisäksi osa puuteollisuuden kiinteistä puutähteistä käy hakkeen raaka-aineeksi. Myös ainespuun laatuvaatimukset täyttäviä puita tai puun osia voidaan käyttää polttohakkeeksi, jos niiden osuus leimikossa on taloudellisesti vähäinen ja hankinta teollisuuskäyttöön kannattamatonta. (Kuitto 2005, 9.)

Kokopuuhake on puun maanpäällisestä biomassasta eli karsimattomasta kokopuusta (runko, oksat ja neulaset) valmistettua haketta. Yleensä hake valmistetaan taimikonhoidossa tai nuoren metsän harvennuksessa syntyneestä pieniläpimittaisesta kokopuusta. Rankahake on karsitusta pieniläpimittaisesta

runkopuusta tehty hake. Kokopuuhakkeesta ja rankahakkeesta voidaan käyttää yhteisnimitystä pienpuuhake. (Kuitto 2005, 9.)

Hakkuutähdehake on ainespuun korjuussa syntyvästä hakkuutähteestä tehtyä haketta. Hakkuutähde tarkoittaa yleensä ainespuuksi kelpaamatonta runkopuuta ja oksia. Vihreähake eli viherhake on tuoreesta hakkuutähteestä tai kokopuusta tehty hake, jossa lehdet ja neulaset ovat mukana. Ruskeahake on vastaavaa kuin vihreähake mutta siinä neulasmassa on vähäinen kuivattamisen johdosta. (Kuitto 2005, 9.)

Hakkeen palakoko ei ole yhtenäistä, minkä vuoksi hakkeen tiiviyskin vaihtelee. Mitä pienempi on hakkeen palakoko, sitä tiiviimpää hake on. Kokopuu- ja hakkuutähdehake sisältävät enemmän hienoainesta kuin esimerkiksi kuitupuuhake. Tuoreiden oksien haketuksesta syntyy tavallisesti ylipitkiä kappaleita, jotka alentavat hakkeen tiiviyttä. Kuivuneen raaka-aineen oksista syntyy paljon vähemmän ylipitkiä oksanpätkiä. Tämän vuoksi kuivasta raaka-aineesta syntyy tiiviimpää haketta. Jäätynyt raaka-aine on haurasta ja tuottaa haketuksessa enemmän hienoainesta, jolloin hakkeestakin tulee normaalia tiiviimpää. Pelletöimällä hakkeesta voitaisiin saada vielä tiiviimpää ja tasalaatuisempaa. (Alakangas 2000, 48-49.)

2.3.3 Kauran olki

Kaura on yksivuotinen heinäkasvi, jonka kukinto eroaa muista viljoista. Kukintoa kutsutaan röyhyksi. Kauran tärkeimmät käyttötarkoitukset ovat rehut ja elintarvikekäyttö. Kauraa voidaan viljellä vaatimattomillakin viljelymailla, sillä se ei ole arka happamuudelle ja se viihtyy myös kosteammilla viljelymailla. Kauraa viljellään koko Suomessa mutta laajimmat viljelmät ovat Keski- ja Etelä-Suomessa. Kaikkiaan Suomessa viljellään kauraa noin 370 000 hehtaarilla, mikä on 13% EU-alueen kaurantuotannosta (Kaurayhdistys 2010, hakupäivä 7.1.2014; Ruokatieto yhdistys ry 2014, hakupäivä 7.1.2014.)

Kauran jyvät ja olki soveltuvat kiinteänä polttoaineena käytettäviksi. Jyvien ja oljen erilaisista palamisominaisuuksista johtuen niitä käytetään erikseen

(Alakangas 2000, 98). Olki on viljankorjuun sivutuote, joka yleensä silputaan peltoon tai käytetään eläinten kuivikkeeksi tai rehuksi. Olki korjataan yleensä kantti- tai pyöröpaaleihin, mutta se voidaan korjata myös irtotavarana tarkkuussilppurilla tai noukinvaunulla. (Lötjönen 2007, hakupäivä 7.1.2014; Ruokatieto yhdistys ry 2014, hakupäivä 7.1.2014.)

Olkipellettejä käytetään lähinnä kuivituskäyttöön eläinten karsinoissa. Energiakäyttöön tuotettujen olkipellettien käyttö on vähäistä. Ainakaan pienten biopolttimoiden käyttöön olkipelletit eivät sovellu runsaan klinkkerin muodostuksen vuoksi. (Kukkonen 2013, hakupäivä 27.2.2014, 43-44; Mixbiopells 2011, hakupäivä 27.2.2014.)

2.3.4 Ruokohelppi

Ruokohelppi on monivuotinen heinäkasvi, joka kasvaa Suomessa luonnonvaraisena Lappia myöten. Ruokohelppi muodostaa noin 1,5-2 metrin korkuisia, tiheitä ja pitkäikäisiä kasvustoja. Ruokohelpikasvustoon kehittyvät uusia versoja aina lokakuulle saakka, mutta eniten niitä muodostuu keväällä ja syksyllä. Energian tuotantoon käytettäessä ruokohelven arvokkain osa on korsi, joka sisältää vähemmän kivennäisaineita ja enemmän selluloosaa kuin lehdet. (Pahkala, Isolahti, Partala, Suokangas, Kirkkari, Peltonen, Sahramaa, Lindh, Paappanen, Kallio & Flyktman 2005, 5-6.)

Energia- ja kuitukäyttöön kasvatettavista heinäkasveista ruokohelppi on osoittautunut kaikkein satoisimmaksi. Ruokohelppi tuottaa satoa vähintään 10-12 vuotta. Ensimmäinen sato voidaan korjata kaksi vuotta kylvön jälkeen. Se on 20-40 % seuraavien vuosien satoja huonompi. Toisesta satovuodesta lähtien ruokohelven kuiva-ainesato on noin 6-8 tonnia hehtaarilta. Keväällä korjatun sadon laatuominaisuudet ovat energiakäytön kannalta hyvät, sillä korren osuus biomassasadosta on silloin suuri. Korren tuhkapitoisuus on pienempi ja kuitupitoisuus suurempi kuin lehtien, lehtituppien ja kukintojen. Ruokohelpisadon korjuussa käytetään samoja menetelmiä, kuin oljen korjuussa. (Pahkala ym. 2005, 7.)

Kuljetuskustannusten pienentämiseksi ja kattilaan syötön helpottamiseksi ruokohelpi voidaan tiivistää pelleteiksi. Ruokohelpipellettien tuhkansulamisoimaisuuksien ja korkean klooripitoisuuden vuoksi ne eivät sovi poltettaviksi pienkiinteistöjen puupellettipolttimoissa. Jotta ruokohelpipellettejä voisi polttaa kattilassa, siihen tulisi asentaa liikkuva arina tai palopää sekä klooria kestävä tulipinnat. Suuret voima- ja lämpölaitokset puolestaan eivät ole ruokohelpipelleteistä kiinnostuneita, koska niiden käyttö tulisi irtotavaraa kalliimmaksi. Sopiva käyttökohde ruokohelpipelleteille voisi olla jotain näiden väliltä, kuten esimerkiksi koulukiinteistöt, pienten taajamien lämpölaitokset ja erilaiset lämpöyrittäjäkohteet. (Lötjönen & Knuutila 2009, 36-38.)

3 AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Raaka-aineet ja raaka-aineseokset

Ekopelletti – T&K –hankkeessa tehdyissä pelletöintikokeissa pellettien raaka-aineina käytettiin purua, haketta, kauran olkea, ruokohelpeä ja näiden erilaisia seoksia (TAULUKKO 1). Hake valmistettiin ensiharvennuspölystä sekä ojien varsilta kerätystä puusta. Pelletöintikokeessa kauran olkea ja ruokohelpeä sekoitettiin hakkeen ja purun kanssa. Osassa pelleteistä on käytetty sideaineena lignosulfaattia. (Imppola, Takalo-Kippola, Pakonen, Kylmänen, Jokinen & Kuokkanen 2013, 16.)

TAULUKKO 1. Tutkittavien pellettien raaka- ja sideaineiden seossuhteet

1.Puru 100%
2.Hake 33,3 % / Puru 66,66 %
3.Hake 33,33 % / Puru 66,66 %
4.Puru 100%
5.Puru 100%
6.Kauran olki 100 %
7.Kauran olki 25 % / Puru 75 %
8.Kauran olki 50 % / Puru 50 %
9.Kauran olki 75 % / Puru 25 %
10.Kauran olki 100 %
11.Hake 25 % / Kauran olki 75 %
12.Hake 50 % / Kauran olki 50 %
13.Hake 75 % / Kauran olki 25 %
14.Hake 100 %
15.Hake 50 % / Kauran olki 50 %
16.Ruokohelpi 100%
17.Hake 50 % / Ruokohelpi 50 %
18.Hake 25 % / Ruokohelpi 75 %
19.Puru 50 % / Ruokohelpi 50 %
20.Ruokohelpi 74 % / Hake 24 % / Lignosulfonaatti 2 %
21.Hake 65 % / Kauran olki 33 % / Lignosulfonaatti 2 %
22.Hake 98 % / Lignosulfonaatti 2 %
23.Hake 95 % / Lignosulfonaatti 5 %
24.Hake 100 %
25.Puru 100 %
26.Hake 100 %
27.Puru 100 %
28.Hake 80 % / Ruokohelpi 20 %
29.Hake 80 % / Ruokohelpi 20 %
30.Ruokohelpi 100 %

3.2 Pelletöintilaitteisto

Pelletöintikokeet tehtiin Oulun ammattikorkeakoulun omistamalla merikonttiin sijoitetulla pelletöintilaitteistolla, jonka on valmistanut Sweden Power Chippers. Laitteistoon kuuluu raaka-aineen esimurskain, vasaramylly, pellettipuristin, pellettien jäähdytystorni ja näitä osia yhdistävä materiaalin kuljetusjärjestelmä (KUVIO 2). (Sweden Power Chippers AB 14-17.)



KUVIO 1. Oulun ammattikorkeakoulun pelletöintilaitteisto (Kuva: Mikko Aalto)

Pelletöitävän materiaalin hienonnus tehdään kahdessa vaiheessa. Ensimmäinen materiaali ajetaan esimurskaimen läpi, josta se jatkaa vasaramyllylle. Esimurskain hienontaa karkean maksimissaan 50 x 50 mm raaka-aineen tasalaatuisiksi alle 10 x 5 mm kokoiseksi materiaaliksi. Esimurskain toimii 11

kW:n sähkömoottorilla, jonka maksimikapasiteetti puulla on 400 kg tunnissa. (Sweden Power Chippers AB 14-17.)

Seuraavaksi esimurskaimella hienonnettu materiaali imetään teholtaan 5,5 kW:n vasaramyllylle, joka hienontaa materiaalin pelletöintiin sopivaksi. Materiaalin karkeutta voidaan muuttaa vasaramyllyn seulaa vaihtamalla. Käytettävissä ovat 3, 4, 5, 6 ja 8 mm seulat. Hienommalle materiaalille ei tarvitse käyttää esimurskainta, vaan sille riittää pelkän vasaramyllyn käyttö. (Sweden Power Chippers AB 14-17.)

Seuraavaksi hienonnettu aines siirretään välivarastoon ilman avulla. Laitteistossa on matalarakenteinen sykloni, jonka alapuolella on sulkusyötin, joka purkaa hienonnetun raaka-aineen välivarastoon. Välivarastossa on sekoitin, jonka ansiosta raaka-aineen sekaan voidaan lisätä lisä- ja sideaineita. (Sweden Power Chippers AB 14-17.)

Välivarastosta raaka-aine syötetään ruuvikuljettimella pellettipuristimen sisäänottoaukkoon. Pellettipuristin on rengasmatriisipuristin, jossa raaka-aine putoaa syöttöpyörän päälle, joka työntää materiaalin matriisiin. Kun paine ja lämpötila nousevat, massa puristetaan pelletiksi, joka tulee ulos matriisista. Seuraavaksi pellettien lämpötilaa lasketaan jäähdytystornissa, jossa käytetään alipainetta ja ilma imetään pois ristikkolevyn avulla. Lopuksi pelletit siirretään varastoon. (Sweden Power Chippers AB 14-17.)

3.3 Pellettien määritykset

Pelletöintikokeesta kirjattiin ylös pelletöinnin energiankulutus kWh, pelletöintiin kulunut aika, min, sekä muuta huomautettavaa aineen pelletöinnistä. Muihin huomioihin kirjattiin tietoja aineen pelletöityvyydestä sekä pelletöinnissä kohdatuista ongelmista.

3.3.1 Raaka-aineen määritykset

Raaka-aineesta määritettiin irtotiheys (g/l), kosteusprosentti ja pelletöintiin käytetyn raaka-aineen määrä (kg). Irtotiheys lasketaan raaka-aineesta samalla periaatteella kuin pelleteistäkin. Raaka-aineen kosteus määritettiin pikatestillä tarkoitukseen soveltuvalla mittalaitteella. Pelletöintiin käytettävän raaka-aineen määrä oli melkein kaikissa kokeissa 30 kg. Joidenkin raaka-aineiden kohdalla käytettiin yli tai alle 30 kg raaka-ainemääriä.

3.3.2 Pellettien irtotiheys

Pellettien irtotiheys riippuu hiukkasten tiheydestä ja huokostilavuudesta. Mitä korkeampi irtotiheys, sitä enemmän energiaa pelletti sisältää ja suuren irtotiheyden omaavilla pelleteillä on myös pienemmät kuljetus- ja varastointikustannukset. Suuri irtotiheys on näin ollen taloudellisesta näkökulmasta tavoiteltavaa pellettien tuottajille, vähittäismyyjille, välittäjille, jakelijoille ja asiakkaille. (Obernberger & Thek 2010, 48-49.)

Irtotiheys lasketaan punnitsemalla tietynkokoinen ja sylinterin muotoinen astiallinen näytettä. Astian tulee olla valmistettu sileäpintaisesta ja iskunkestävästä materiaalista, jotta astian tilavuus ei muutu. Astian tilavuus lasketaan punnitsemalla ensin tyhjä astia, minkä jälkeen se täytetään vedellä maksimitasoon ja punnitaan. Astian tilavuus lasketaan veden nettopainosta ja veden tiheydestä (1 kg/dm^3).

Astia täytetään näytemateriaalilla siten että muodostuu korkein mahdollinen keko. Täytetty astia pudotetaan 150 mm korkeudelta puulevyille, jolloin materiaali kasaantuu. Liika aine poistetaan soiron avulla, jonka jälkeen astia punnitaan. Lopuksi punnitaan vielä toinen astiallinen näytettä, jotta saadaan kaksi toistoa. (SFS-Käsikirja 35-2 2012, 267-286.)

Irtotiheys saapumistilassa (SFS-Käsikirja 35-2 2012, 267-286.)

$$BD_{ar}(M_{ar}) = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

missä BD_{ar} on irtotiheys saapumistilassa, kg/m³

M_{ar} on kosteuspitoisuus saapumistilassa paino-%

m_2 on täyden astian massa, kg

m_1 on tyhjän astian massa, kg

V on mittausastian nettotilavuus, m³

Kuivan aineen irtotiheys BD_d

$$BD_d = BD_{ar} * \frac{100 - M_{ar}}{100}$$

3.3.3 Kosteuspitoisuus

Kosteuspitoisuus kertoo kuinka suuri osuus mitattavan materiaalin painosta on vettä. Kosteuspitoisuus ilmoitetaan prosentteina.

Ensimmäiseksi punnitaan tyhjä astia ja näytteellä täytetty astia. Kosteuspitoisuus lasketaan kuivaamalla näytettä ensin siihen asti, että saavutetaan vakiomassa, mikä tarkoittaa alle 24 tuntia (105 ± 2) °C. Näyte ja vertailuastia punnitaan 10-15 sekuntia uunista ottamisen jälkeen. Kosteuspitoisuus saadaan laskettua haihtuneen näyteosuuden ja kostean näytteen alkuperäisen massan suhteesta.

Biopolttoaineen kosteuspitoisuus saapumistilassa (Pellettien laadunmääritys 2011, hakupäivä 16.1.2014; SFS-Käsikirja 35-2 2012, 217-228)

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5) + m_6}{(m_2 - m_1) + m_6} * 100$$

$$U_d = \frac{M_{ar}}{100 - M_{ar}} * 100$$

missä M_{ar} on haihtunut näyteosuus (g)/kostean näytteen alkuperäinen massa (g)

m_1 on tyhjän astian massa (g)

m_2 on astian ja näytteen massa ennen kuivausta (g)

m_3 on astian ja näytteen massa kuivauksen jälkeen (g)

m_4 on vertailuastian massa ennen kuivausta (g)

m_5 on vertailuastian massa kuivauksen jälkeen (g)

m_6 on pakkaukseen sitoutuneen kosteuden massa (g)

U_d on kosteuspitoisuus

3.3.4 Mekaaninen kestävyys

Pellettituotannon yksi tärkeimmistä parametreista on mekaaninen kestävyys, koska pienhiukkasten suuri määrä voi aiheuttaa ongelmia pellettien varastossa ja syöttöruuvissa erilaisten tukkeumien takia. Lisäksi pienhiukkasten suuri määrä lisää pölyn syntymistä ja kuljetuksessa tapahtuvia hävikkejä. Tämän vuoksi uusia pelletin tuotantoon soveltuvia kasveja etsittäessä kiinnitetään huomiota erityisesti mekaaniseen kestävyteen. (Oberberger & Thek 2010, 51-52.)

Rummutuslujuus tarkoittaa palamaisten kiinteiden polttoaineiden kestävyttä mekaanisia rasituksia vastaan. Rummutuslujuus määritetään yleensä rasittamalla polttoainetta pyörivässä rummussa. Rasituksen seurauksena pelleteistä irronnut hienoaine seulotaan erilleen pelleteistä. Seulaa läpi mennyt osuus punnitaan ja sen prosentuaalinen osuus kokonaismassasta kuvaa pellettien lujuutta. Mitä vähemmän hienoainetta on, sitä lujempia pelletit ovat. (Alakangas 2000, 14; Hyrkäs 2010, 20.)

Rummutuslujuus testataan (500 ± 10) g näytemäärällä, jonka massa on punnittu 0,1 g tarkkuudella. Näytettä rummutetaan nopeudella 50 ± 2 kierrosta minuutissa 500 kierrosta. Lopuksi näyte seulotaan ja lasketaan hienoaineksen osuus pelleteistä. (SFS-käsikirja 2012, 331-346.)

Mekaaninen kestävyys (SFS-Käsikirja 35-2 2012, 331-341.)

$$D_u = \frac{m_a}{m_e * 100}$$

missä D_u on mekaaninen kestävyys prosentteina

m_a on seulottujen pelletien massa testauskäsittelyn jälkeen (g)

m_e on pelletien massa ennen testauskäsittelyä (g)

3.4 Polttokoe ja polttokokeen määritykset

Pelletöintikokeessa lupaavimmiksi osoittautuneet pelletit valittiin polttokokeisiin. Polttokokeet toteutettiin kahdessa erässä kahdella erilaisella polttimella: kuppimallisella ja pyöriväärinlaisella. Kokeissa käytettiin samanlaista kattilaa, jonka nimellisteho on 20 kW. Polttokokeissa määritettiin kattilan teho, suora hyötysuhde, ylempi lämpöarvo sekä savukaasujen häkä- ja typpioksidipitoisuudet. (Impola, Takalo-Kippola, Pakonen, Kylmänen, Jokinen & Kuokkanen 2013, 4.)

Polttokokeet suoritettiin Thermia Biomatic+ -kattilalla, jonka nimellisteho on 20kW sekä Petrojet Biorobot 30 -polttimella. Nämä on valjastettu tutkimuskäyttöön lisäämällä polttoaineen tuloaukkoon muoviputki, jonne pelletit syötetään. Kattilan yhteydessä on Kamstrup-lämpöenergiamittari, joka kerää tietoja saadusta lämpöenergiasta ja tehosta sekä kattilalta palaavan ja sinne menevän veden lämpötilasta minuutin välein. Dräger MSI Compact – savukaasuanalysaattori puolestaan kerää tietoja kattilan sisällä olevasta savukaasujen poistokanavasta. Toinen savukaasuanalysaattori KANE900 Plus mittaa kattilalta poistuvan savukaasukanavan kaasujen lämpötilaa ja

pitoisuuksia osamittauksina 10 minuutin välein. (Kukkonen 2013, hakupäivä 20.1.2014, 10-16.)

3.4.1 Lämpöarvo

Lämpöarvo on energiamäärä tiettyä massaa kohti, joka vapautuu täydellisessä palamisessa. Ylempään (kalorimetriseen) lämpöarvoon lasketaan mukaan polttoaineen sisältämä vedyn palamisenergia sekä vedystä ja hapesta syntyneen veden höyrystymisenergia. Tämän vuoksi ylempi lämpöarvo on muita lämpöarvolukuja suurempi. (Obernberger & Thek 2010, 10-11; Motiva 2013, hakupäivä 14.1.2014.)

Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (alempi lämpöarvo) on yleisin Suomessa käytetty tapa lämpöarvon ilmoittamiseen. Siinä savukaasujen mukana poistuvaa veden haihduttamiseen kuluva energia ei lasketa mukaan tulokseen. Kolmas tapa lämpöarvon ilmoittamiseen on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Tällöin lämpöarvo on alin, koska lämpöarvoa laskettaessa vähennetään energiamäärä, joka kuluu polttoaineen luontaisesti sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihtumiseen. Tehollinen lämpöarvo on sitä pienempi, mitä enemmän polttoaine sisältää vettä. (Motiva 2013, hakupäivä 14.1.2014.)

Lämpöarvo määritetään yleensä pommikalorimetrisesti. Pommikalorimetrillä mitataan vapautuvaa lämpömäärää, kun näytettä poltetaan happi-ilmakehässä veden ympäröimässä suljetussa astiassa. Lämpöenergia siirtyy polton seurauksena pommia ympäröivään veteen, aiheuttaen vedessä lämpötilan nousun, jota laite mittaa. Lämpötilan muutoksen perusteella voidaan laskea vapautuva lämpömäärä. Pommikalorimetri on kalibroitu siten, että tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Kalibrointi tehdään käyttämällä näytettä, jonka tarkka lämpöarvo tiedetään. (Kuokkanen, Kolppanen & Kuokkanen 2011 hakupäivä 15.1.2014, 1-2.)

Kalorimetri kalibroidaan ensin bentsoehapolla, jonka avulla voidaan määrittää laitteen kalorimetrivakio C. (Kuokkanen ym. 2011, hakupäivä 15.1.2014, 2-3.)

$$C = \frac{26,44 * m}{\Delta T_1 - \Delta T_0}$$

missä C= kalorimetrivakio

m1 on bentsoehapon massa

ΔT_1 on bentsoehapon palamisesta johtuva lämpötilanmuutos [°C]

ΔT_0 on sytytyksestä ja langan palamisesta johtuva lämpötilanmuutos [°C]

Kun kalorimetrivakio on määritetty, voidaan laskea minkä tahansa näytteen (neste tai kiinteä) ominaislämpötila ΔH_m [kJ/g] seuraavasta yhtälöstä. (Kuokkanen ym. 2011, hakupäivä 15.1.2014, 3.)

$$\Delta H_m = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_0) * C}{m_2}$$

missä ΔH_m on näytteen ominaispalamislämpö [kJ/g]

ΔT_2 on ilmakehän näytteen palamisesta johtuva lämpötilanmuutos [°C]

ΔT_0 on sytytyksestä ja langan palamisesta johtuva lämpötilanmuutos [°C]

C=kalorimetrivakio [kJ/°C]

m_2 on näytteen massa [g]

Polttoaineen kalorimetrinen (ylempi) lämpöarvo $Q_{gr,d}$ (Kuokkanen ym. 2011, hakupäivä 15.1.2014, 2-4.)

$$Q_{gr,d} = Q_{gr,ad} * \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

missä $Q_{gr,d}$ on kuiva-aineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo [MJ/kg]

$Q_{gr,ad}$ on ilmakeivan näytteen kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]

M_{ad} on ilmakeivan näytteen analyysikosteus [%]

Absoluuttinen kuivan polttoaineen tehollinen (alempi) lämpöarvo $Q_{net,d}$ (Kuokkanen ym. 2011, hakupäivä 15.1.2014, 2-4.)

$$Q_{net,d} = Q_{gr,d} - 0,02441 * H\% * \frac{18,015}{2,016}$$

missä 0,02441 [MJ/kg] = veden höyrystymislämmöstä aiheutuva korjaustekijä vakiotilavuudessa (+25 °C)

H % on Polttoaineen sisältämä vedyn määrä prosentteina

18,015 on veden H₂O molekyylipaino

2,016 on vedyn H₂ molekyylipaino

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa $Q_{net,ar}$ (Kuokkanen ym. 2011, hakupäivä 15.1.2014, 2-4.)

$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} * \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02443 * M_{ar}$$

missä $Q_{net,d}$ on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

M_{ar} on vastaavan polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa painotettuna kostean polttoaineen massalla [%]

0,02443 [MJ/kg] on veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä vakiopaineessa (+25 °C)

3.4.2 Tuhkapitoisuus

Tuhka on polttoaineen poltossa syntyvää sivutuotetta. Kotitalouskäyttöön tarkoitettujen pellettien tuhkapitoisuuden pitäisi olla mahdollisimman matala käyttäjäturvallisuuden vuoksi. (Obernberger & Thek 2010, 58-59.)

Tuhkapitoisuuden määrittäminen aloitetaan kuumentamalla tyhjää astiaa uunissa vähintään 60 minuuttia, minkä jälkeen astian annetaan jäähtyä 5-10 minuuttia. Astia jäähdytetään huoneenlämpötilaan eksikaattorissa, jossa on kuivausainetta. Astia punnitaan 0,1 mg tarkkuudella, jonka jälkeen astiaan lisätään vähintään 1 g näytettä astian pohjalle tasaisena kerroksena. Astia punnitaan 0,1 mg tarkkuudella ja laitetaan uuniin. Lämpötila nostetaan 30-50 minuutin kuluessa 250 °C:een, jossa se pidetään 60 minuuttia. Sen jälkeen lämpötila nostetaan (550 ± 10) °C:een 30 minuutissa. Tässä lämpötilassa se pidetään vähintään 120 minuuttia, minkä jälkeen se otetaan uunista ja jäähdytetään 5-10 minuuttia. Näytteen annetaan jäähtyä eksikaattorissa, jossa on kuivausainetta, huoneenlämpötilaan. Jäähdytynyt astia punnitaan 0,1 mg tarkkuudella.

Tuhkapitoisuus (Pellettien laadunmäärittäminen 2011, hakupäivä 16.1.2014):

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

missä A_d on tuhkapitoisuus

M_{ad} on kosteuspitoisuus

m_1 on tyhjän astian massa (g)

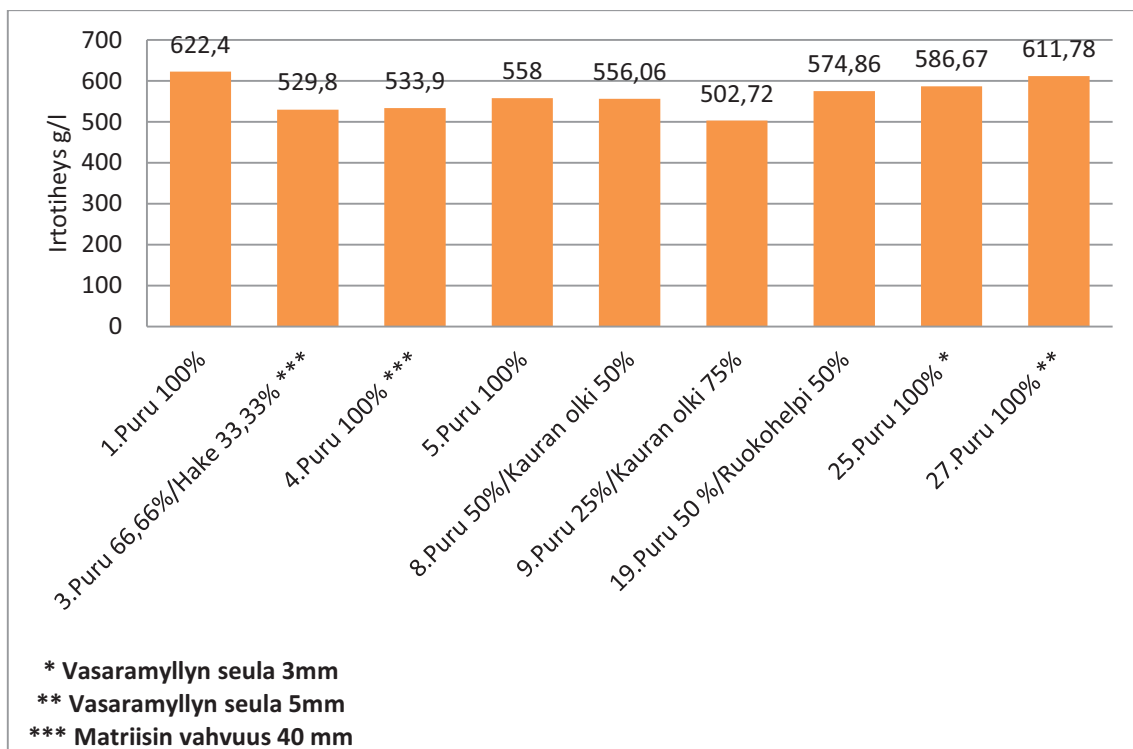
m_2 on astian ja testausnäytteen massa (g)

m_3 on astian ja tuhkan massa.

4 TULOKSET

4.1 Pellettien irtotiheys

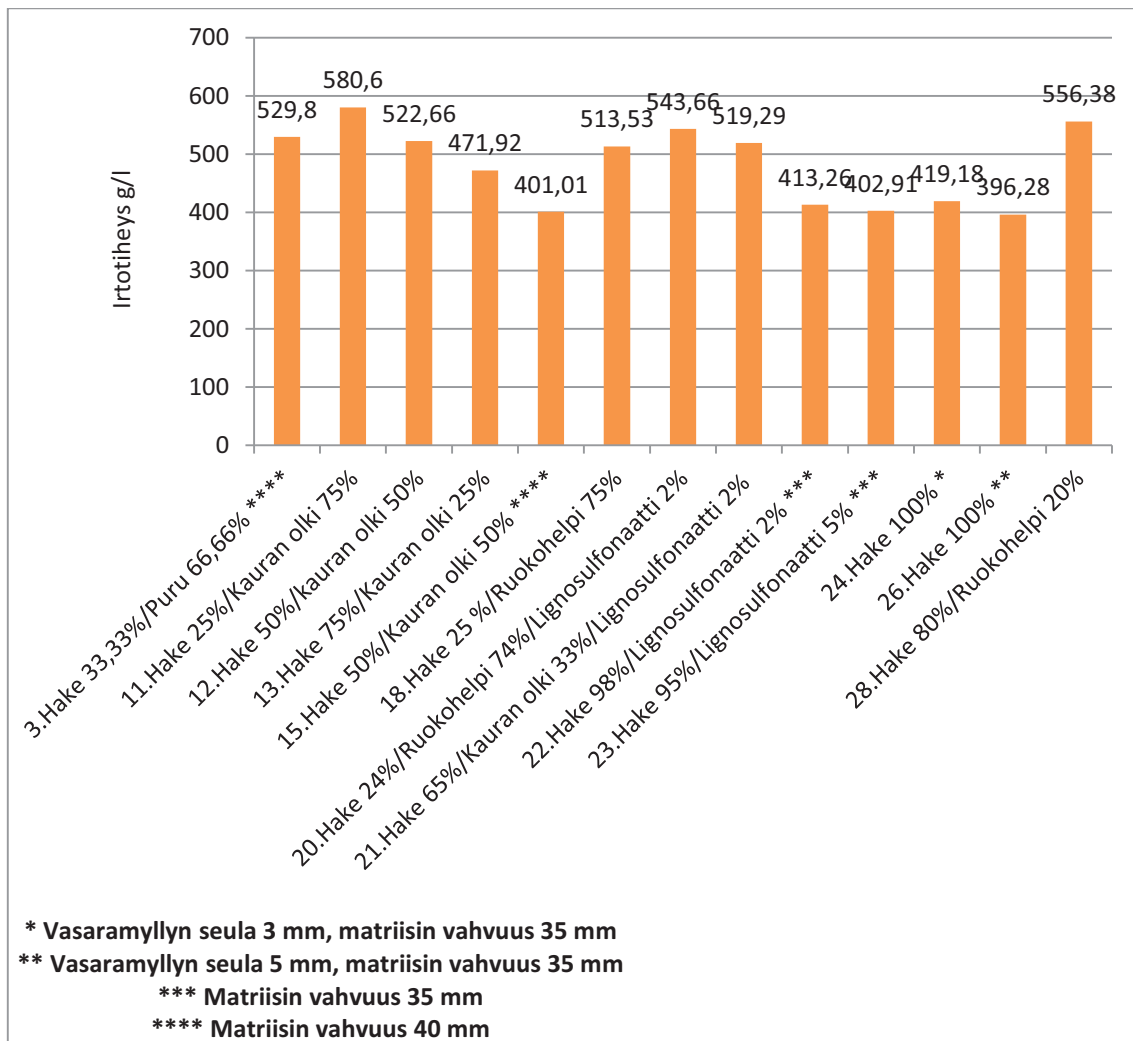
Irtotiheydestä tavoitellaan mahdollisimman korkeaa lukemaa, sillä irtotiheys kertoo, paljonko energiaa on pellettiin sisältynyt. Yleisimmin vasaramyllyn seulan kokona käytettiin 6 mm, matriisin kanavan halkaisijana 8 mm ja vahvuutena 55 mm. Poikkeavuudet näistä arvoista on ilmoitettu taulukossa. Lignosulfonaattia käytettiin sideaineena neljässä kokeessa.



KUVIO 2. Purua sisältävien pellettien irtotiheydet

Kaikkein korkein kokeissa saavutettu irtotiheys 622,4 g/l oli pelletillä 1, joka sisälsi pelkkää purua (KUVIO 2). Huonoimmillaankin pelkkää purua sisältävien pellettien irtotiheys oli 533,9 g/l (4) mutta tällöin matriisikanavan vahvuus oli

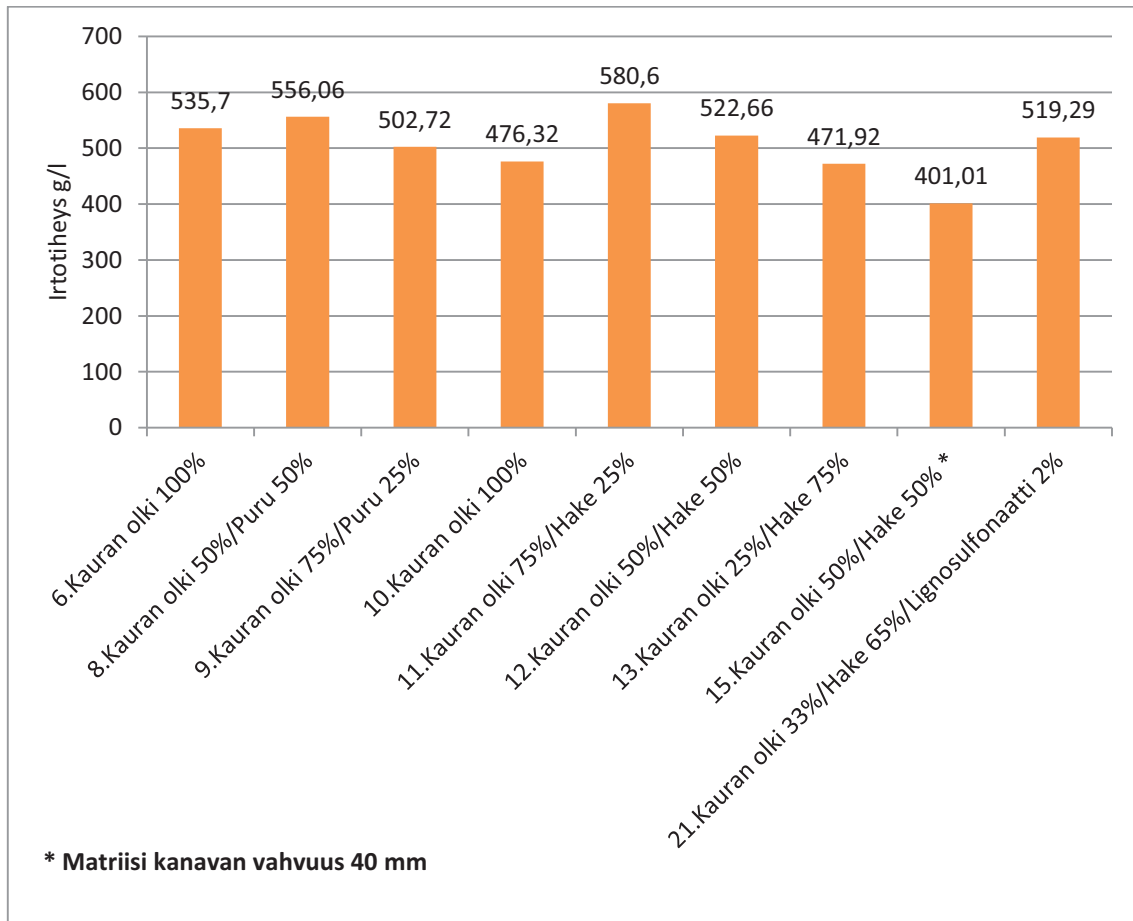
pienempi kuin muissa vastaavissa kokeissa. Myös silloin kun purua sekoitettiin hakkeen, kauran oljen tai ruokohelven kanssa, irtotiheys osoittautui hyväksi, sillä tällaisten pellettien irtotiheys ei missään vaiheessa jäänyt alle 500 g/l. Vasaramyllyn seulan pienentäminen ei aiheuttanut suurta muutosta purupellettien irtotiheyteen, vaan arvot ovat hyvin samansuuntaisia. Kun matriisin vahvuutta pienennettiin, irtotiheys aleni hieman.



KUVIO 3. Haketta sisältävien pellettien irtotiheydet

Pelletit, joissa käytettiin pelkkää haketta, olivat irtotiheydeltään melko heikkoja. Hakepellettien irtotiheys oli keskimäärin 408 g/l (KUVIO 3). Lignosulfonaatin käyttö sideaineena ei juuri vaikuttanut hakepellettien irtotiheyteen. Sen sijaan,

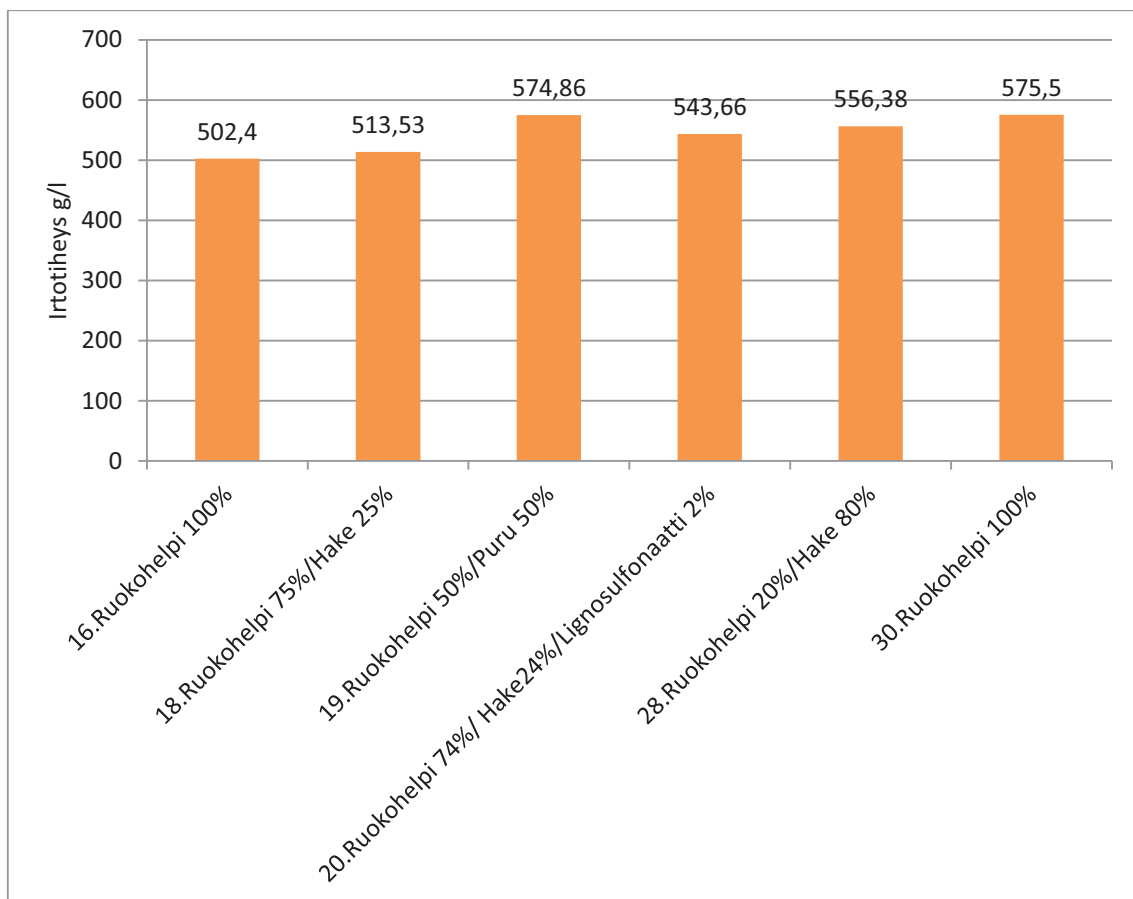
kun haketta sekoitettiin sopivalla suhteella ruukohelven tai kauran oljen kanssa, saatiin huomattavasti korkeampia irtotiheyksiä. Kauran oljen kanssa sekoitettuna irtotiheys oli yleensä sitä parempi, mitä pienempi osuus oli haketta. Ruukohelven kanssa sekoitettuna paras irtotiheys saatiin pelletillä 28, jossa oli haketta 80 % ja ruukohelpeä 20 %. Tulos ei ole linjassa kokeen muiden tulosten kanssa, sillä yleensä pienempi osuus haketta on tuottanut paremmat irtotiheydet. Matriisin vahvuuden pienentäminen vähensi yleensä myös pellettien irtotiheyttä. Samanlainen vaikutus näyttäisi olevan myös vasaramyllyn seulan kokoa pienennettäessä.



KUVIO 4. Kauran olkea sisältävien pellettien irtotiheydet

Pelkästä kauran oljesta tehtyjen pellettien irtotiheys vaihteli 476-535 g/l, joka ei yllä parhaiden raaka-aineiden tasolle (KUVIO 4). Korkeimmat irtotiheydet saatiin

pelletistä 11, jossa sekoitettiin 25% haketta ja 75% kauran olkea. Kun hakkeen määrää lisättiin, irtotiheys pieneni. Lignosulfonaatin käyttö hakkeen ja kauran oljen kanssa sideaineena nosti hieman irtotiheyttä. Myös pelletti 8, jonka seoksessa on 50% purua ja 50% kauran olkea, tuotti hyvän irtotiheyden (KUVIO 5). Kun kauran oljen osuutta lisättiin ja purun osuutta pienennettiin, irtotiheys pieneni. Irtotiheyden kannalta tarkasteltuna kauran olki ei ole yhtä hyvä pellettien raaka-aine kuin puru tai ruokohelpi, mutta parempi kuin hake.



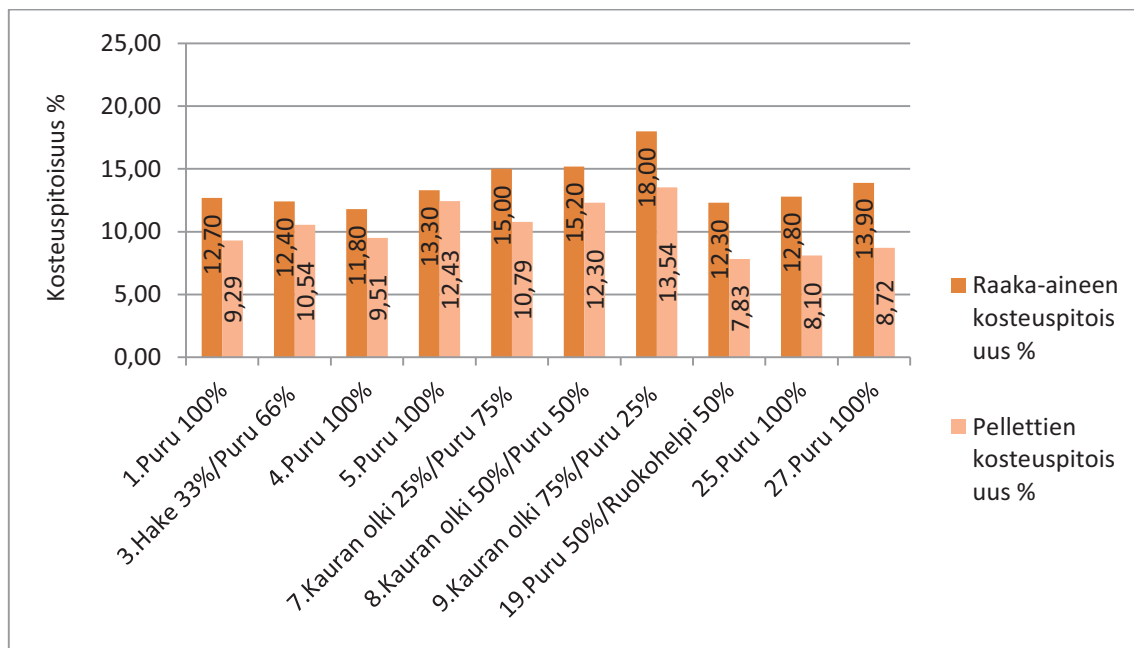
KUVIO 5. Ruokohelpeä sisältävien pellettien irtotiheydet

Ruokohelpipellettien irtotiheyksissä erot olivat melko pieniä (KUVIO 5), sillä pienimmän ja suurimman arvon erotus oli vain 73,1 g/l. Ruokohelpipellettejä voisi verrata purupelletteihin, sillä niiden tulokset olivat hyvin samansuuruisia.

Parhaat tulokset irtotiheydestä saatiin ruokohelvellä yksinään sekä purun kanssa sekoitettuna. Myös ruokohelpeä ja kauran olkea sisältäneet pelletit saivat melko hyviä tuloksia irtotiheydestä. Huomioitavaa on, että toisiaan vastaavat pelkkää ruokohelpeä sisältäneet pelletit numero 16 sekä numero 30, saivat irtotiheydestä arvoja molemmista ääripäistä. Numero 16 oli irtotiheydeltään 502,4 g/l, joka oli alhaisin irtotiheys ruokohelpeä sisältäneistä pelleteistä g/l ja numero 30 oli 575,5 g/l, joka puolestaan oli korkein irtotiheys ruokohelpeä sisältäneistä pelleteistä.

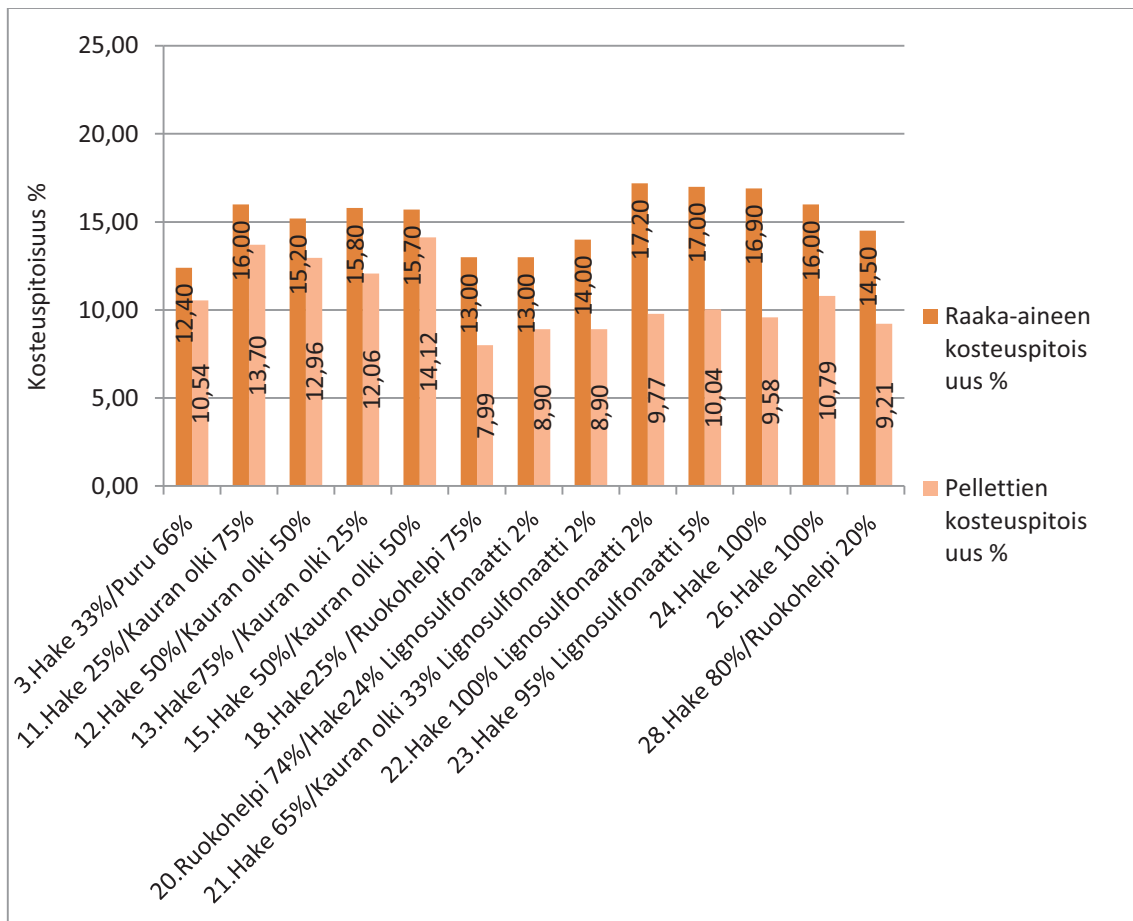
4.2 Kosteuspitoisuus

Kosteuspitoisuus mitattiin niin raaka-aineesta kuin pelleteistäkin. Pelletin raaka-aineen optimikosteus on 10-15 %. Jos raaka-aine on tätä kosteampaa, se olisi hyvä kuivata ennen pelletöintiä. (Pellettienergia 2013, hakupäivä 6.2.2014.) Puupellettien kosteuspitoisuudeksi puolestaan suositellaan 8-10 % (Kofman 2007, hakupäivä 7.2.2014).



KUVIO 6. Purua sisältävien pellettien kosteuspitoisuudet

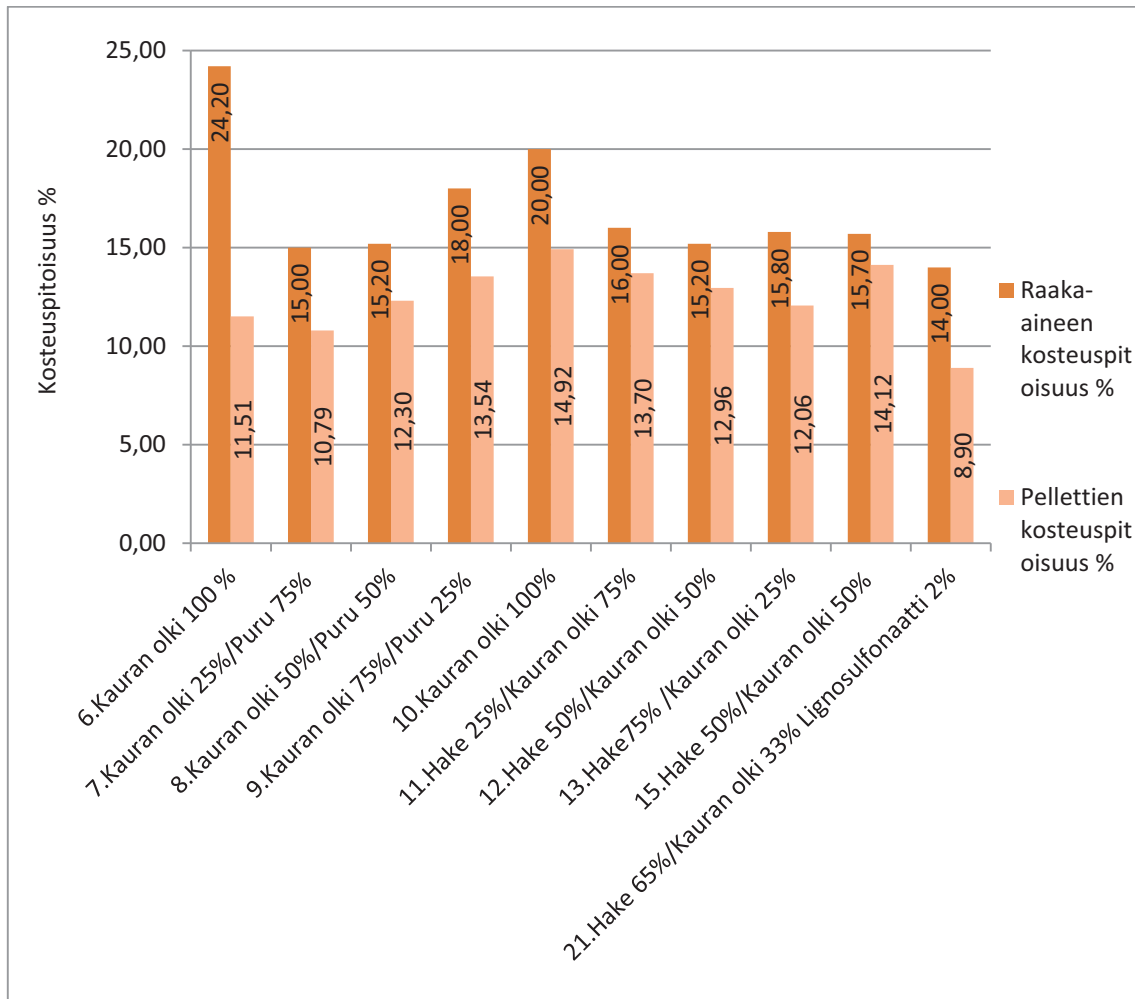
Pelleteillä, joiden raaka-aineena oli käytetty purua, saivat yleensä melko alhaisia kosteuspitoisuuksia. Raaka-aineen kosteuspitoisuus oli kauran olkea ja purua sisältäneillä pelleteillä hieman yli 15 % ja loppuilla purua sisältäneillä pelleteillä alle 15 % (KUVIO 6). Pellettien kosteuspitoisuus oli melko alhaisella tasolla. Alle kymmenen prosentin kosteuspitoisuuteen ylsivät pelkkää purua sekä purua ja ruokohelpeä sisältäneet pelletit. Kuitenkin pelkkää purua sisältäneen pelletin 5 kosteuspitoisuus oli 12,43 %, joka on muita vastaavia pellettejä selvästi korkeampi kosteuspitoisuus. Purua sisältävistä pelleteistä korkeimmat kosteuspitoisuudet mitattiin puolestaan pelletistä, jossa oli lisäksi käytetty kauran olkea. Tällöin kosteuspitoisuus oli yli 10 %.



KUVIO 7. Haketta sisältävien pellettien kosteuspitoisuudet

Reilu kolmannes haketta sisältäneiden pellettien raaka-aineen kosteuspitoisuuksista oli alle 15 % (KUVIO 7). Matalimpia raaka-aineen kosteuspitoisuuksia saivat hakkeen lisäksi ruokohelpeä tai purua sisältäneet pelletit. Kaikki 15 % kosteuspitoisuuden ylittäneet raaka-aineet koostuivat pelkästä hakkeesta tai hakkeesta ja kauran oljesta.

Varsinkin pelkästä hakkeesta koostuvat pelletit menettivät pelletöinnissä niin paljon kosteutta, että kaikkien niiden kosteuspitoisuus oli 9-11 % (KUVIO 7). Myös ainoa haketta ja purua sisältävä pelletti (3) sai suhteellisen matalan kosteuspitoisuuden 10,5 %. Kauran olkea sisältäneet seokset menettivät vähemmän kosteutta pelletöinnissä ja niiden kosteuspitoisuudet olivat hakepelleteistä korkeimmat 12-15 %. Ruokohelpeä ja haketta sisältäneet pelletit säilyttivät matalimman kosteuspitoisuutensa pelletöinnin jälkeenkin. Niiden kosteuspitoisuus oli 8-10 % (KUVIO 8).

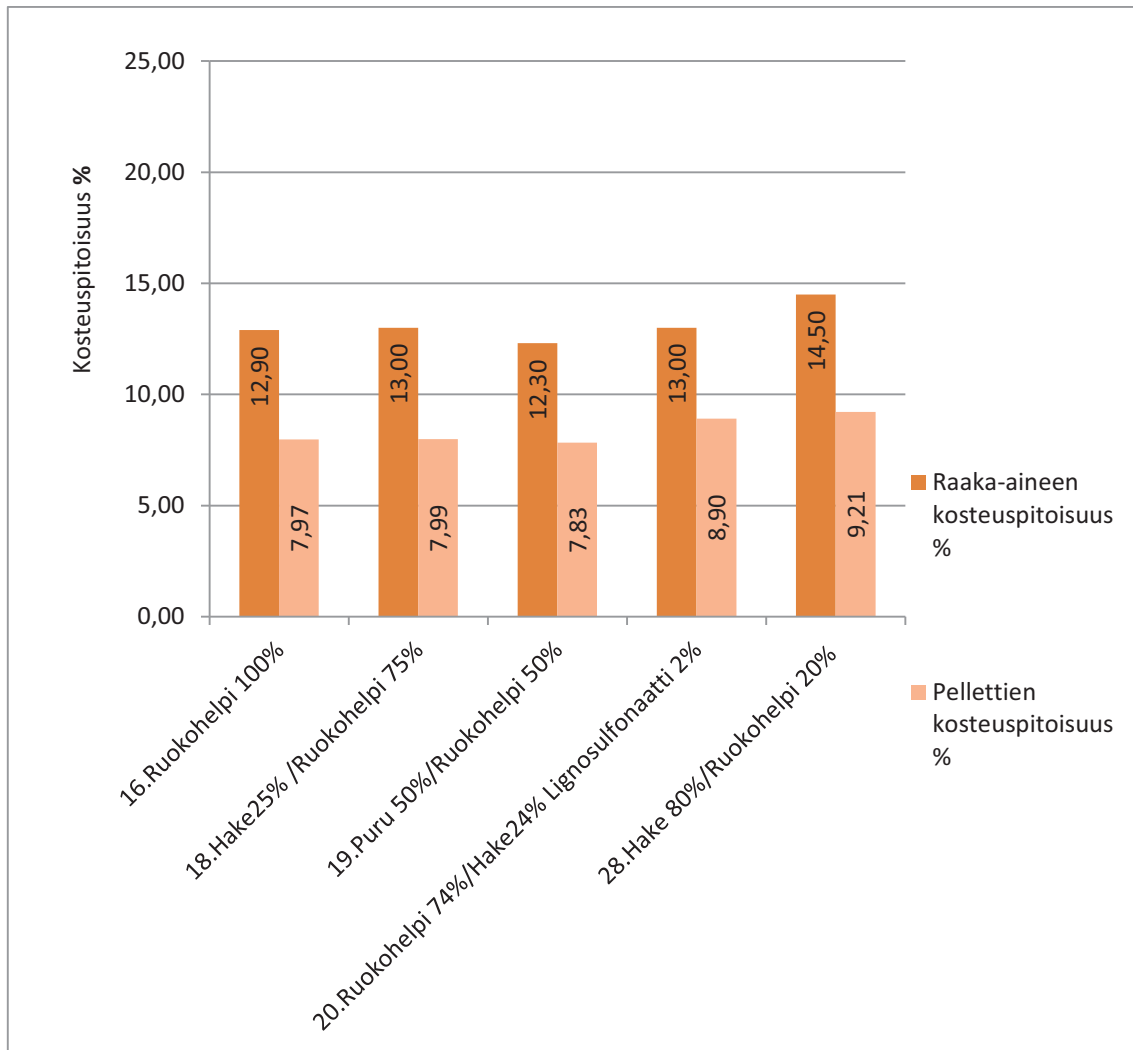


KUVIO 8. Kauran olkea sisältävien pellettien kosteuspitoisuudet

Kauran olkea sisältäneiden pellettien raaka-aineiden kosteuspitoisuudet olivat pelletöintikokeen korkeimpia. Vain yksi kauran olkea sisältävä seos (21) ylsi alle 15 %:n kosteuspitoisuuteen (KUVIO 8). Korkeimpia raaka-aineen kosteuspitoisuuksia mitattiin pelkkää kauran olkea sisältäneistä pelleteistä, joiden kosteuspitoisuudet olivat jopa yli 20 %. Purun ja kauran oljen seokselta mitattiin yleensä hieman matalampia kosteuspitoisuuksia raaka-aineesta kuin hakkeen ja kauran oljen seoksen raaka-aineesta.

Kauran olkea sisältäneiden pellettien kosteuspitoisuudet noudattivat samaa linjaa kuin raaka-aineidenkin kosteuspitoisuudet eli mitä korkeampia kosteuspitoisuuksia raaka-aine sai, sitä korkeammat olivat pellettien kosteuspitoisuudet (KUVIO 8). Näin ollen haketta ja kauran olkea sisältävät

pelletit olivat hieman kosteampia kuin purua ja kauran olkea sisältäneet pelletit. Poikkeuksen sääntöön muodostaa kokonaan kauran oljesta valmistettu pelletti (6), jonka kosteuspitoisuus oli 11,5 %, vaikka raaka-aineen kosteuspitoisuus oli yksi kokeen korkeimpia. Sen sijaan toisen pelkistä kauran oljesta valmistetun pelletin (10) kosteuspitoisuus oli kokeen korkein, lähes 15 %.



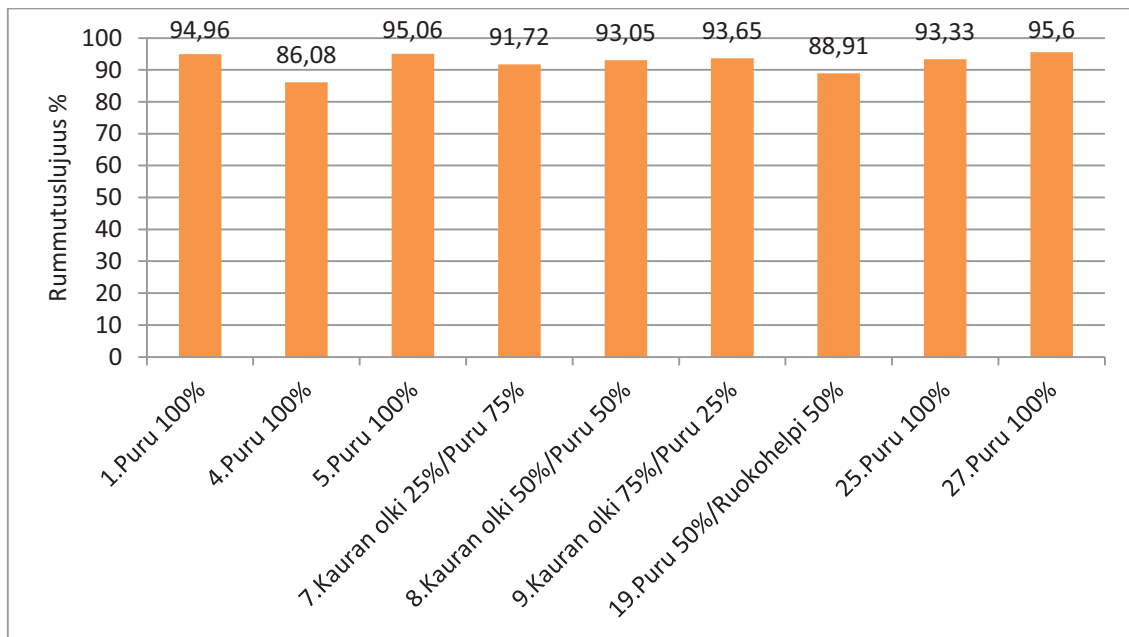
KUVIO 9. Ruokohelpeä sisältävien pellettien kosteuspitoisuudet

Raaka-aineiden kosteuspitoisuudet olivat kaikilla ruokohelpeä sisältäneillä seoksilla 10-15 %:n välillä (KUVIO 9). Alhaisin raaka-aineen kosteuspitoisuus oli purun ja ruokohelven seoksella (19) ja korkein oli hakkeen ja ruokohelven seoksella (28). Myös pellettien kosteuspitoisuudet olivat melko alhaisella

tasolla. Kaikkien ruokohelpeä sisältävien pellettien kosteuspitoisuus oli alle 10 %. Pelletit noudattavat kosteuspitoisuudella mitattuna samaa järjestystä kuin raaka-aineiden kosteuspitoisuudetkin (KUVIO 9).

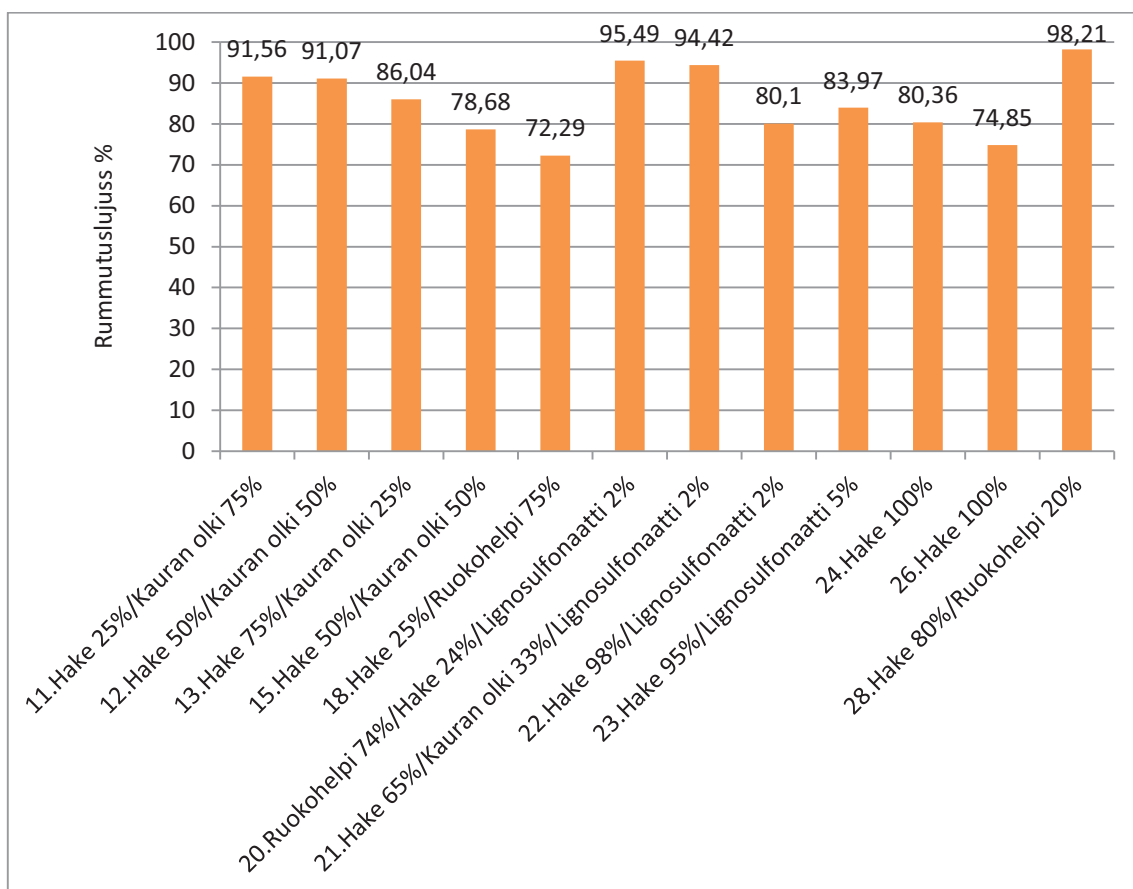
4.3 Mekaaninen kestävyys

Mekaanista kestävyyttä mitattiin rummutuslujuudella. Mitä korkeampi arvo saatiin, sitä parempia olivat tulokset. Kaikista kokeen pelleteistä ei mitattu rummutuslujuutta, minkä vuoksi osasta pelleteistä puuttuu mekaaniset kestävyudet tuloksista.



KUVIO 10. Purua sisältävien pellettien rummutuslujuudet

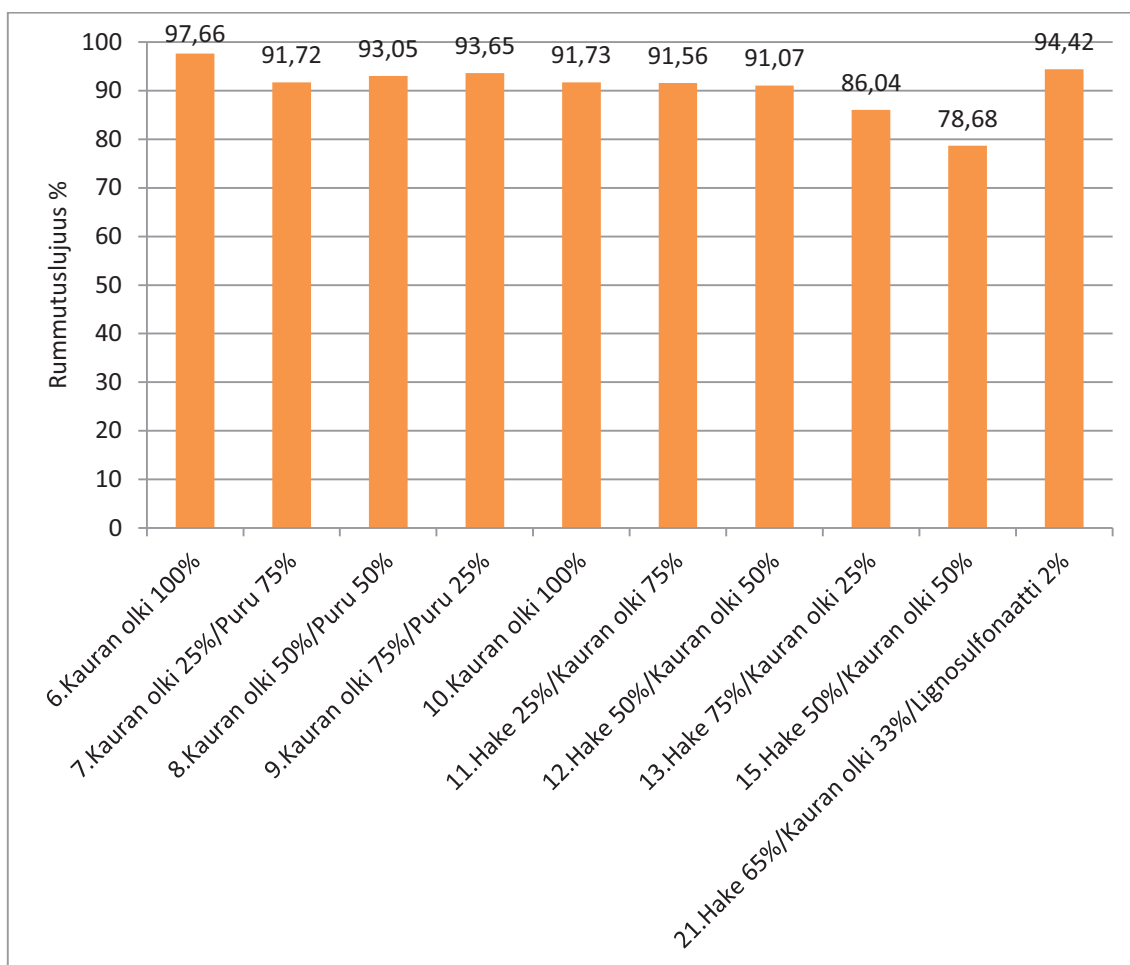
Purupellettien mekaaninen kestävyys oli hyvä, sillä huonoimmillaankin purua sisältävä pelletti sai rummutuslujuudesta arvoksi 86,08 % (4) (KUVIO 10). Yleensä rummutuslujuus oli yli 90 % raaka-aineseoksesta riippumatta. Kun seoksessa on purua, näyttävät rummutuslujuuden arvot pysyvän yleensä hyvinä.



KUVIO 11. Haketta sisältävien pellettien rummutuslujuudet

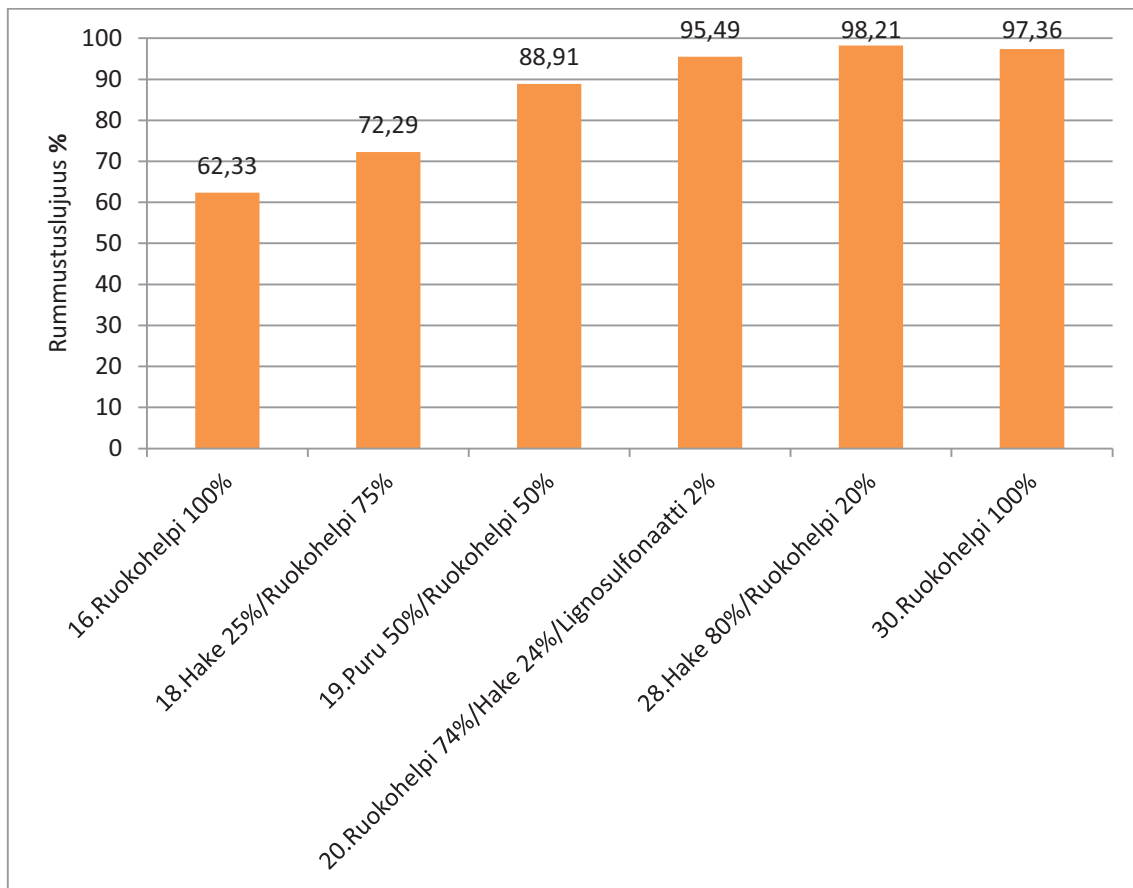
Hake vaikuttaisi rummutuslujuuden perusteella olevan heikohko raaka-aine pelleteille. Seoksissa haketta sisältävät pelletit saavat rummutuslujuudesta erinomaisia arvoja. Sen sijaan pelkkää haketta raaka-aineena käyttävien pellettien (24 ja 26) rummutuslujuusarvot jäivät melko mataliksi (KUVIO 11).

Myös hakkeen kanssa seoksena valmistettujen pellettien rummutuslujuudet vaihtelivat huomattavasti. Pelletöintikokeissa 18 ja 20 hakkeen ja ruokohelven osuudet olivat lähes samat, mutta rummutuslujuudet vaihtelivat huomattavasti. Rummutuslujuuksien eron näyttäisi selittävän lignosulfonaatti. Paras rummutuslujuus (yli 98 %) oli pelletillä, jonka raaka-aineena oli 80 % haketta ja 20 % ruokohelpeä. Tulos oli poikkeuksellinen, sillä yleensä haketta sisältävät pelletit eivät saaneet kovin hyviä tuloksia rummutuslujuudesta.



KUVIO 12. Kauran olkea sisältävien pellettien rummutuslujuudet

Kauran olkea sisältäneet pelletit saivat erinomaisia tuloksia rummutuslujuudesta (KUVIO 12). Kaikkien kokeiden tulos, kahta lukuun ottamatta, oli rummutuslujuudesta yli 90 %. Nämä kaksi koetta (13 ja 25) sisälsivät molemmat haketta. Paras rummutuslujuus saatiin pelletiltä, joka sisälsi vain kauran olkea. Toiseksi paras rummutuslujuustulos saatiin kauran olki pelletiltä, jossa oli oljen lisäksi käytetty vain lignosulfonaattia sideaineena.

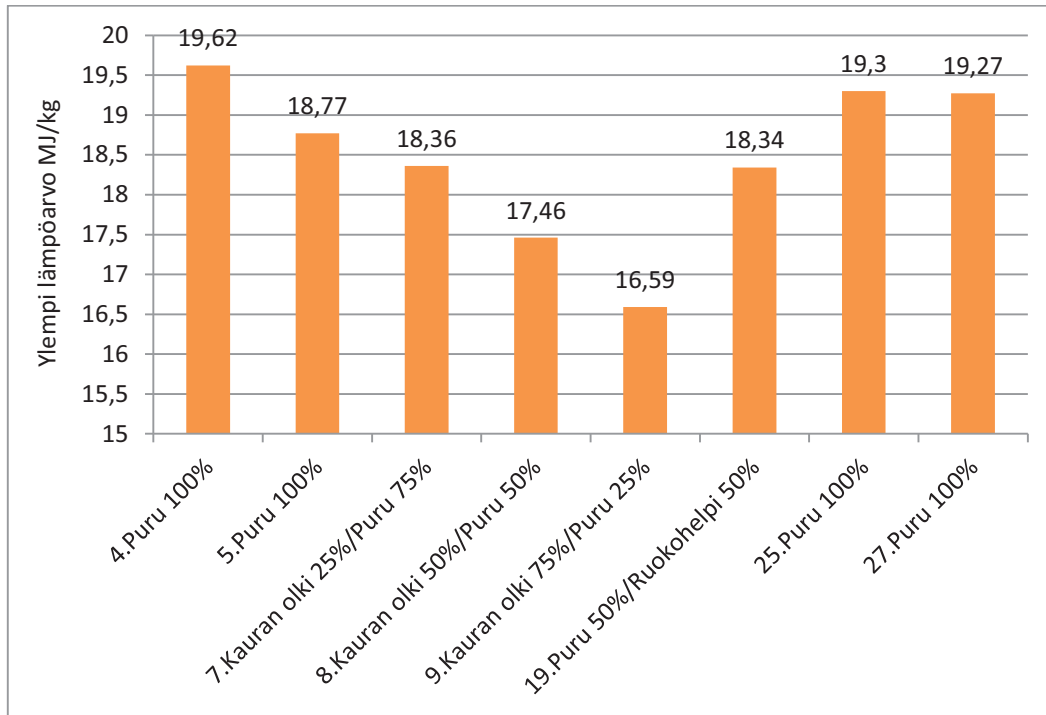


KUVIO 13. Ruokohelpeä sisältävien pellettien rummutuslujuudet

Ruokohelpeä sisältävien pellettien rummutuslujuuden tulokset vaihtelivat huomattavasti (KUVIO 13). Esimerkiksi pelkkää ruokohelpeä sisältävän pelletin (16) rummutuslujuus oli 62,33 % mutta toisen samanlaisen pelletin (30) tulos oli 97,36 %. Myös hakkeen kanssa sekoitettuna ruokohelpipelletin rummutuslujuus oli yli 98 %, mikä on poikkeuksellista, sillä yleensä näin paljon haketta sisältäneet pelletit eivät saaneet kovin hyviä tuloksia rummutuslujuudesta.

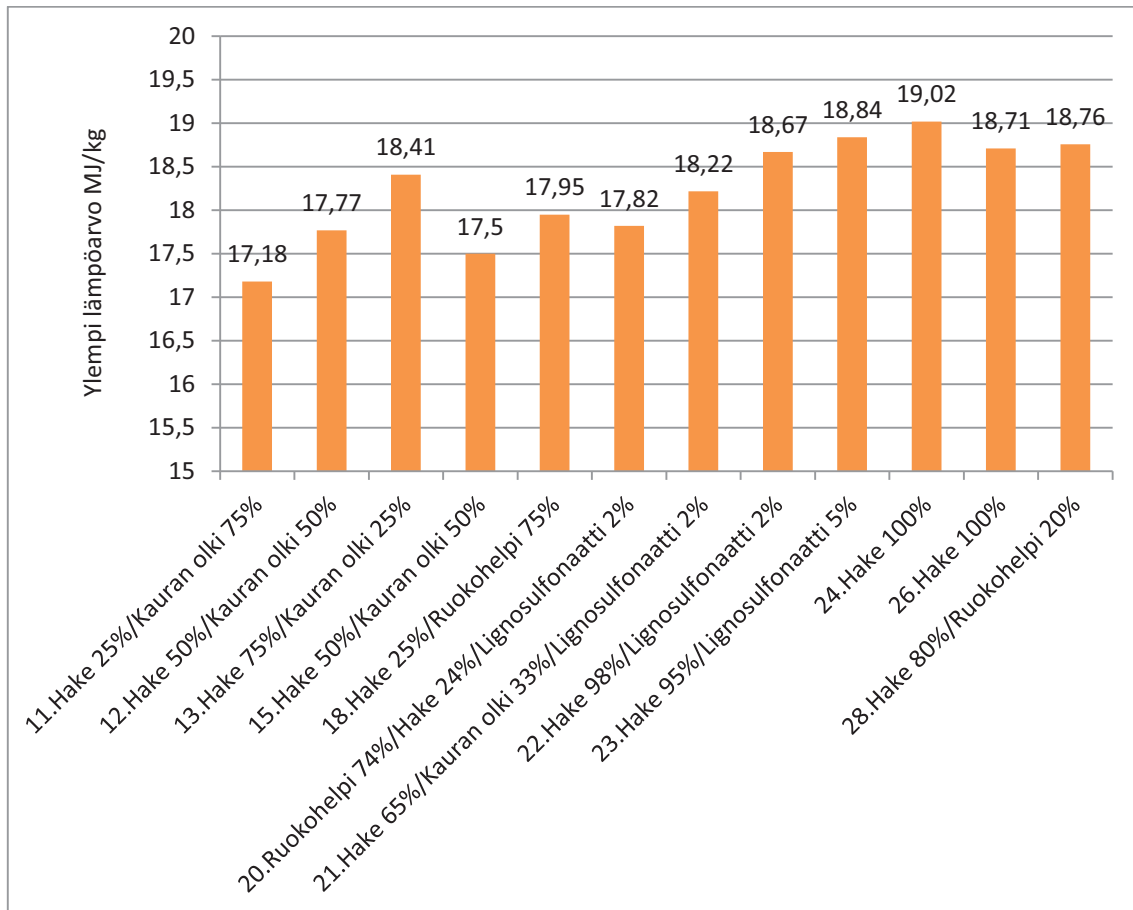
4.4 Ylempi lämpöarvo

Lämpöarvo kertoo täydellisessä palamisessa syntyvän lämmön energia-arvon polttoaineen massayksikköä kohden.



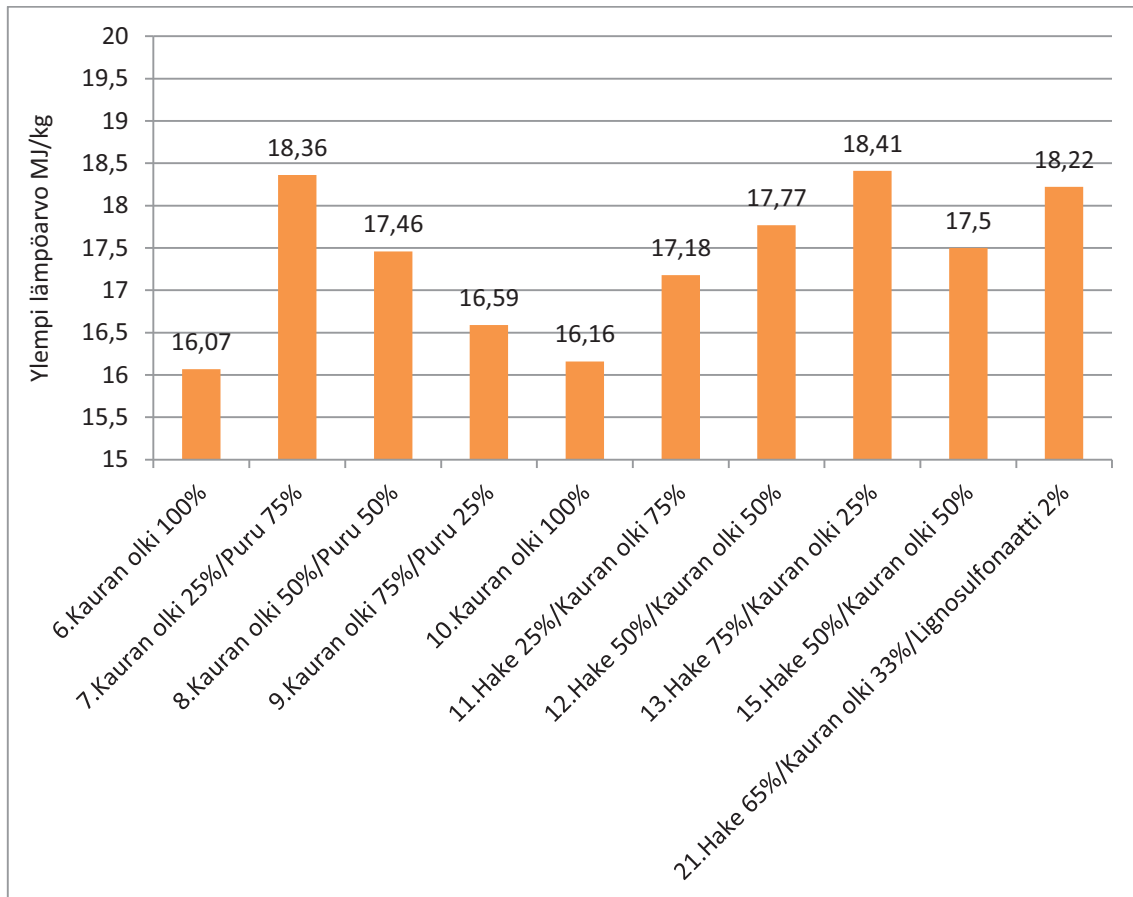
KUVIO 14. Purua sisältävien pellettien ylemmät lämpöarvot

Puraa sisältävien pellettien ylemmät lämpöarvot vaihtelivat 16,59 MJ/kg:sta 19,62 MJ/kg:an (KUVIO 14). Näiden pellettien ylempien lämpöarvojen keskiarvo oli 18,46 MJ/kg, joka oli kokeen raaka-aineista paras keskiarvo. Parhaat lämpöarvot saivat pelkkää purua sisältävät pelletit. Alimmilleen lämpöarvot laskivat, kun valtaosa pelletin raaka-aineesta oli kauran olkea. Ruokohelven ja purun sekoituksen lämpöarvo oli vastaavaa kauran oljen ja purun seosta parempi. Ylempi lämpöarvo oli yleensä sitä parempi, mitä suurempi osuus seoksesta oli purua.



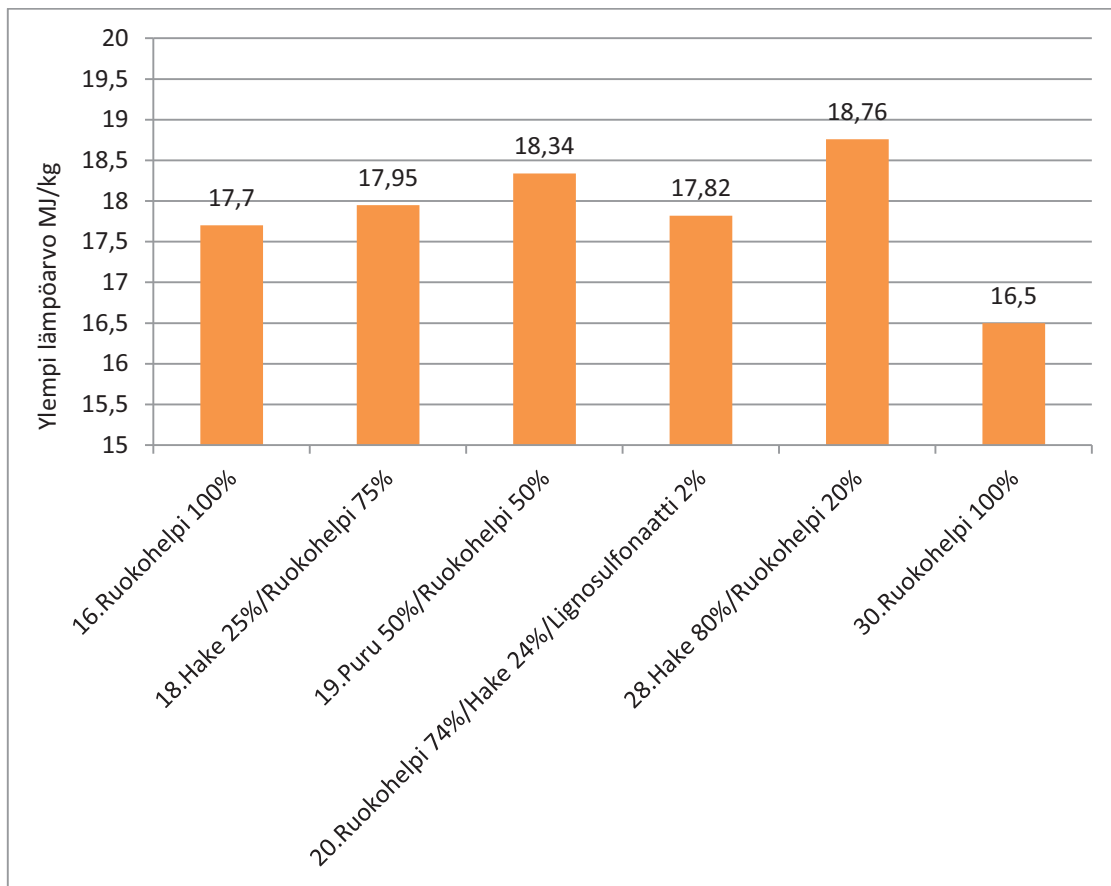
KUVIO 15. Haketta sisältävien pellettien ylemmät lämpöarvot

Haketta sisältävien pellettien ylemmät lämpöarvot vaihtelivat 17,18 MJ/kg:sta 19,02 MJ/kg:an (KUVIO 15). Näiden keskiarvo oli hieman purupellettejä matalampi ollen 18,24 MJ/kg. Purun tavoin myös hake sai parhaat lämpöarvot, kun pelletti koostui pelkästä hakkeesta. Huonoimmat lämpöarvot saavutettiin seoksilla kauran oljen kanssa. Ruokohelven ja hakkeen seosten ylemmät lämpöarvot asettuvat näiden kahden seoksen väliin.



KUVIO 16. Kauran olkea sisältävien pellettien ylemmät lämpöarvot

Kauran olkea sisältävien pellettien ylemmät lämpöarvot olivat pelletöintikokeen heikoimpia, minkä osoittaa myös näiden pellettien ylempien lämpöarvojen keskiarvo 17,37 MJ/kg (KUVIO 16). Parhaimmillaan ylempi lämpöarvo oli kauran oljen ja hakkeen seoksella. Alimmillaan lämpöarvo oli pelkästä kauran oljesta valmistetuilla pelleteillä, joiden arvot olivat kokeen heikoimpia. Pellettien lämpöarvo oli yleensä sitä parempi mitä pienempi osuus seoksesta oli kauran olkea.

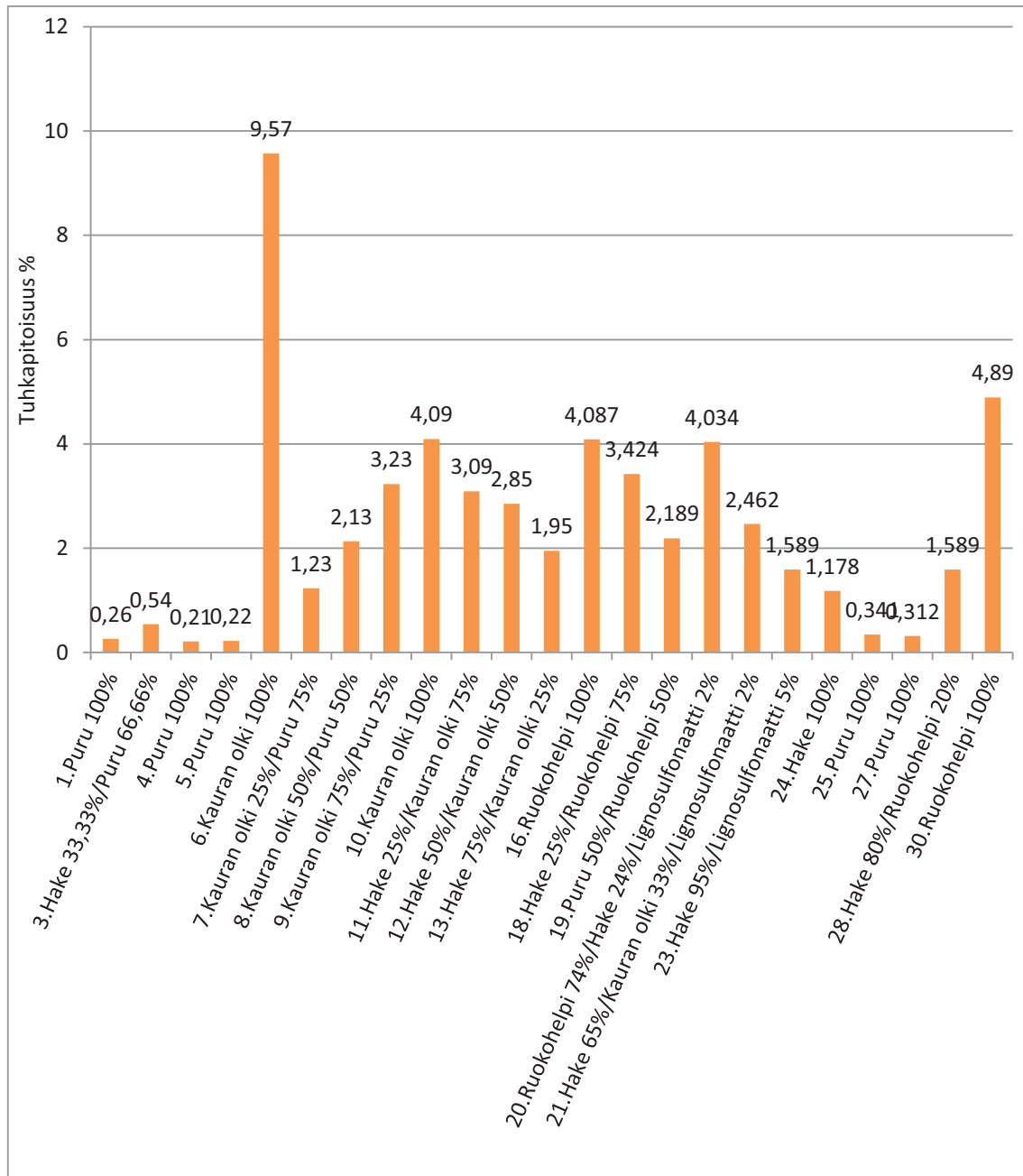


KUVIO 17. Ruokohelpeä sisältävien pellettien ylempät lämpöarvot

Ruokohelpipellettien ylempät lämpöarvot olivat parempia kuin kauran olkipellettien, mutta eivät kuitenkaan yhtä hyviä kuin puuraaka-aineista valmistettujen pellettien lämpöarvot. Niiden keskiarvo on 17,85 MJ/kg. Paras lämpöarvo näistä pelleteistä oli hakkeen ja ruokohelven seoksella (KUVIO 17), jonka lämpöarvo oli 18,76 MJ/kg. Huonoimmat lämpöarvot olivat pelkkää ruokohelpeä sisältävillä pelleteillä, jotka saavuttivat alimmillaan 16,5 MJ/kg lämpöarvon. Ruokohelvenkin kohdalla voidaan sanoa, että mitä enemmän pelletissä on puuraaka-aineita, sitä parempia ovat lämpöarvot.

4.5 Tuhkapitoisuus

Pellettien polttokokeissa tuhkapitoisuudesta tavoitellaan mahdollisimman pientä arvoa, sillä tuhkan tuotanto ei ole polttoaineelta tavoiteltava ominaisuus. Tuhkapitoisuudet vaihtelivat purun 0,21 %:n tuhkapitoisuudesta kauran oljen 9,57 %:iin (KUVIO 18).



KUVIO 18. Pellettien tuhkapitoisuudet

Pienimmät tuhkapitoisuudet saivat purusta valmistetut pelletit. Purusta valmistettujen pellettien tuhkapitoisuuden keskiarvo oli 1,07 %. Pelkkää purua sisältäneet pelletit saivat tuhkapitoisuudesta arvokseen alle puoli prosenttia. Muiden raaka-aineiden lisääminen purun sekaan kasvatti tuhkapitoisuutta.

Toiseksi parhaimmat tuhkapitoisuudet saavutettiin hakkeesta valmistetuilla pelleteillä. Haketta sisältävien pellettien tuhkapitoisuuksien keskiarvo oli 2,27 %. Vain yhdestä pelkkää haketta sisältäneestä pelletistä saatiin mitattua tuhkapitoisuus, ja se oli 1,2 %. Haketta sisältävien pellettien tuhkapitoisuus kasvaa sen mukaan, mitä enemmän sen kanssa sekoitetaan kauran olkea tai ruokohelpeä.

Kauran olkea sisältäneet pelletit saivat tuhkapitoisuuden keskiarvoksi 3,4 %. Tuhkapitoisuuden kannalta tarkasteltuna kauran olki ei vaikuta erityisen hyvältä raaka-aineelta pelleteille, sillä pelkstä kauran oljesta valmistettujen pellettien tuhkapitoisuudet ovat kokeen korkeimpia: noin 9,6 % ja 4,1 %. Lisäksi muiden raaka-aineiden kanssa sekoitettuna kauran olki nostaa selkeästi pellettien tuhkapitoisuutta. Kauran olkea sisältävien pellettien tuhkapitoisuuden keskiarvon alhaisuus selittyy sillä, että kokeessa oli mukana useita seoksia, joissa oli vain 25 % kauran olkea.

Kauran oljen tavoin ruokohelpikään ei vaikuta tuhkapitoisuuden kannalta tarkasteltuna erityisen hyvältä pelletin raaka-aineelta. Ruokohelpeä sisältäneet pelletit saivat tuhkapitoisuuden keskiarvoksi 3,37 %, joka on hieman kauran oljesta valmistettuja pellettejä parempi tulos. Kun ruokohelpeä oli pellettien ainoa raaka-aine, sen tuhkapitoisuudet olivat 4,1 ja 4,9 %. Myös ruokohelvellä vaikuttaisi olevan pellettien tuhkapitoisuutta nostava vaikutus, kun sitä sekoitetaan muiden raaka-aineiden kanssa.

Muutamissa kokeissa tuhkapitoisuus mitattiin myös raaka-aineesta. Pellettien tuhkapitoisuus oli muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta suurempi kuin niiden raaka-aineiden. Erot tuhkapitoisuuksissa olivat kuitenkin hyvin pieniä.

4.6 Pelletöinnin energiankulutus ja pelletöintiin kulunut aika

Pelletöinnin energiankulutus ja pelletöintiin kulunut aika määritettiin vain noin puolesta valmistetuista pelleteistä.

TAULUKKO 2. Pelletöinnin energiankulutus sekä pelletöintiin kulunut aika

Raaka-aineet	Pelletöinnin energian kulutus, MWt/t	Pelletöintiin kulunut aika, min
16.Ruokohelpi 100%	0,1267	20
18.Hake 25%/Ruokohelpi 75%	0,1193	19
19.Puru 50%/Ruokohelpi 50%	0,1300	24
20.Ruokohelpi 74%/Hake 24%/Lignosulfonaatti 2%	0,1310	18
21.Hake 65%/Kauran olki 33%/Lignosulfonaatti 2%	0,1233	14
22.Hake 98%/Lignosulfonaatti 2%	0,1038	14
23.Hake 95%/Lignosulfonaatti 5%	0,1205	12
24.Hake 100%	0,1302	18
25.Puru 100%	0,1661	27
26.Hake 100%	0,1410	11
27.Puru 100%	0,1522	28
28.Hake 80%/Ruokohelpi 20%	0,1455	19
30.Ruokohelpi 100%	0,2078	42

Pelletöinnin energiankulutuksen keskiarvo oli 0,138 MWt/t. Vähiten energiaa kului haketta sisältävien pellettien valmistuksessa, joiden keskiarvo oli 0,127 MWt/t. Toiseksi alhaisin energiankulutus oli ruokohelpipelleteillä, lukuun ottamatta viimeistä koetta. Kaikkien ruokohelpeä sisältäneiden pellettien valmistukseen kuluneen energian keskiarvo oli 0,129 MWt/t. Selvästi eniten energiaa kului purupellettien valmistuksessa, josta keskiarvoksi tuli 0,149 MWt/t. Kauran olkipellettien valmistuksen energiankulutusta ei mitattu.

Pelletöintiin kulunut aika seuraa jossain määrin energiankulutusta, mitä enemmän energiaa pelletöintiin kului, sitä enemmän kului myös aikaa. Pelletöintiin kuluneen ajan keskiarvo oli 20,5 minuuttia. Neljä koetta pelletöitiin alle 15 minuutissa ja ne kaikki sisälsivät haketta. Purun pelletöintiin vaikuttaisi

kuluvan enemmän aikaa, sillä purua sisältäviä pellettejä ei saatu missään vaiheessa pelletöityä alle 20 minuutissa. Ruokohelppi vaikuttaa olevan vähän vaihtelevampi aine pelletöitymiseen kuluneen ajan suhteen. Yleensä sen pelletöintiin kului noin 20 minuuttia mutta viimeinen ruokohelpikoe (30) kulutti aikaa peräti 42 minuuttia.

5 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Tulosten tarkastelu

Tuloksia verrattiin Suomen standardisoimisliitto SFS:n kiinteille biopolttoaineille sovittuihin laatuluokituksiin. Laatuluokituksessa puupelleteillä, olkipelleteillä ja ruokohelpipelleteillä on hieman toisistaan eroavat laatuluokitukset. Puupelleteille on määritelty kolme eri laatuluokkaa A1, A2 sekä B.

Ei teollisuuskäyttöön tarkoitettujen puupellettien parhaimmassa luokassa A1 käytetään vain runkopuuta ja kemiallisesti käsittelemätöntä puutähdettä. Irtotiheyden arvon tulee olla vähintään 600 kg/m³, ja mekaanisen kestävyys yli 97,5 %. Kosteuspitoisuus voi olla korkeintaan 10 %. Tehollinen lämpöarvo saa olla 16,5-19 MJ/kg ja tuhkapitoisuuden tulee olla alle 0,7 %. Seuraavissa puupellettien laatuluokissa A2 ja B pelletin raaka-aineeksi sallitaan muun muassa hakkuutähte ja esimerkiksi pelletin tuhkapitoisuudelle ja teholliselle lämpöarvolle sallitaan huonommat arvot. (SFS-Käsikirja 35-1 2012, 182-189.)

Olkipellettien laatuluokittelussa kosteuspitoisuuden arvon tulisi olla alle 10 % ja mekaanisen kestävyys 97,5 %. Irtotiheyden tulee olla yli 600 g/l. Teholliselle lämpöarvolle ei ole asetettu tavoitetulosta, vaan vaaditaan vain ilmoittamaan minimiarvo. Tuhkapitoisuuden sen sijaan pitää olla alle 6,0 %. Ruokohelpipellettien laatuluokittelussa kosteuspitoisuuden arvon olisi oltava alle 12 % ja mekaanisen kestävyys yli 96,5 %. Irtotiheyden tulisi olla yli 550 kg/m³. Tehollisen lämpöarvon pitäisi olla yli 14,5 MJ/kg ja tuhkapitoisuuden alle 8,0 %. (SFS-Käsikirja 35-1 2012. 272-281.)

Tämän kokeen luokituksessa keskitytään kuitenkin vain puupellettien parhaaseen luokkaan, johon kaikkia tuloksia verrataan. Tämän vuoksi ruokohelpeä tai kauran olkea sisältäneet pelletit voivat näyttää huonommilla kuin mitä ne omien luokitustensa mukaan olisivat. Näin luokiteltuna saadaan kuitenkin selkeimmät tulokset, kun kaikkia pellettejä verrataan samoihin lukuihin ja se tuo myös esille miten muut raaka-aineet vertautuvat puupelleteihin.

5.1.1 Irtotiheys, kosteus ja mekaaninen kestävyys

Laatuluokittelun selkeyttämiseksi pelletit arvioidaan neliportaisen laatuluokittelun mukaan. Vihreällä on merkitty laatuluokkaan 1. kuuluvat pelletit, jotka ovat puupellettien laatuluokittelun täyttäviä arvoja (TAULUKKO 3). Muut arvot eivät ole virallisen laatuluokittelun mukaisia vaan ne kuvaavat eroa, jonka verran arvo on puupelletin laatuluokittelun täyttävää arvoa huonompi. Keltaisella merkityt arvot kuuluvat luokkaan 2, joka on hieman puupellettien parasta laatuluokkaa huonompi. Luokka 3 on jo selvästi laatuluokittelun alapuolella ja luokassa 4 ovat jo selvästi huonot arvot.

TAULUKKO 3. Pellettien irtotiheyden, kosteuden sekä mekaanisen kestävyyden värikoodien raja-arvot

Laatuluokka	Pellettien irtotiheys g/l	Pellettien kosteus %	Mekaaninen kestävyys
1.	>600	<10,0	97,5
2.	550-600	10,0-12,0	92,0-97,5
3.	500-550	12,0-14,0	85,0-92,0
4.	<500	>14,0	<85,0

TAULUKKO 4. Pellettien irtotiheyden, kosteuden ja mekaanisen kestävyysarvojen vertaus laatuluokittelun arvoihin

Raaka-aine	Pellettien irtotiheys, g/l	Pellettien kosteus, %	Mekaaninen kestävyys, %
1.Puru 100%	622.40	9,29	94,96
2.Hake 33,3 %/Puru 66,66 %			
3.Hake 33,33 %/Puru 66,66 %	529.80	10,54	
4.Puru 100%	533.90	9,51	86,08
5.Puru 100%	558.00	12,43	95,06
6.Kauran olki 100 %	535.70	11,51	97,66
7.Kauran olki 25 %/Puru 75 %		10,79	91,72
8.Kauran olki 50 %/Puru 50 %	556.06	12,3	93,05
9.Kauran olki 75 %/Puru 25 %	502.72	13,54	93,65
10.Kauran olki 100 %	476.32	14,92	91,73
11.Hake 25 %/Kauran olki 75 %	580.60	13,7	91,56
12.Hake 50 %/Kauran olki 50 %	522.66	12,96	91,07
13.Hake 75 %/Kauran olki 25 %	471.92	12,06	86,04
14.Hake 100 %			
15.Hake 50 %/Kauran olki 50 %	401.01	14,12	78,68
16.Ruokohelpi 100%	502.40	7,97	62,33
17.Hake 50 %/Ruokohelpi 50 %			
18.Hake 25 %/Ruokohelpi 75 %	513.53	7,99	72,29
19.Puru 50 %/Ruokohelpi 50 %	574.86	7,83	88,91
20.Ruokohelpi 74 %/Hake 24 %/Lignosulfonaatti 2 %	543.66	8,90	95,49
21.Hake 65 %/Kauran olki 33 %/Lignosulfonaatti 2 %	519.29	8,90	94,42
22.Hake 98 %/Lignosulfonaatti 2 %	413,26	9,77	80,1
23.Hake 95 %/Lignosulfonaatti 5 %	402,91	10,04	83,97
24.Hake 100 %	419,18	9,58	80,36
25.Puru 100 %	586,67	8,10	93,33
26.Hake 100 %	396,28	10,79	74,85
27.Puru 100 %	611,78	8,72	95,6
28.Hake 80 %/Ruokohelpi 20 %	556,38	9,21	98,21
29.Hake 80 %/Ruokohelpi 20 %			
30.Ruokohelpi 100 %	575,5	14,61	97,36

Ainoat 1. luokkaan irtotiheydessä yltäneet pelletit olivat pelkkää purua sisältäneet pelletit 1. ja 27. Muut purua sisältäneet pelletit kuuluivat joko toiseen tai kolmanteen luokkaan. Ruokohelpipellettien irtotiheyksien lukemat oikeuttivat ne toiseen tai kolmanteen luokkaan, joten ne olivat irtotiheydellä mitattuna toiseksi parhaita pellettejä. Myös kauran olki pellettien irtotiheyden arvot olivat yleensä toisen tai kolmannen luokan arvoisia mutta varsinkin hakkeen kanssa sekoitettuna irtotiheydet painuivat 4. luokkaan. Pelkkää haketta sisältäneet pelletit luokiteltiin neljänteen eli huonoimpaan luokkaan. Seoksessa muiden raaka-aineiden kanssa hakepelletitkin saivat kolmannen tai toisen luokan tuloksia.

Pellettien kosteuspitoisuuksissa puupellettien laatuvaatimukset täyttäviä pellettejä olivat osa purua, ruokohelpeä tai haketta sisältäneistä pelleteistä. Muutenkin näiden pellettien kosteuspitoisuudet pysyivät hyvällä tasolla, sillä ne kuuluivat yleensä huonoimmillaan toiseen luokkaan ja vain harva niistä jäi kolmanteen luokkaan. Sen sijaan kauran olkea sisältäneet pelletit jäivät yleensä kolmanteen tai neljänteen luokkaan kosteuspitoisuudeltaan.

Mekaanisessa kestävydessä vain harva pelletti ylsi puupellettien laatuluokituksen mukaisiin lukemiin. Ainoastaan pelkkää kauran olkea sisältävä pelletti 6, sekä haketta ja ruokohelpeä sisältävä pelletti 28 olivat puupellettien laatuluokittelun mukaisia. Puru-, kauran olki- ja ruokohelpipelletit ylsivät yleensä vähintään kolmanteen luokkaan. Sen sijaan hakepellettien mekaaninen kestävyys jäi usein neljänteen luokkaan.

5.1.2 Tuhkapitoisuus ja tehollinen lämpöarvo

Jotta lämpöarvoja voitiin verrata Suomen standardisoimisliitto SFS:n kiinteille biopolttoaineille sovittuihin laatuluokituksiin, täytyi ylemmät lämpöarvot ensin muuttaa teholliseksi lämpöarvoksi saapumistilassa. Muutos tehtiin muutoskaavalla, joka on esitetty tämän työn luvussa 3.4.1. Polttoaineen sisältämän vedyn määränä pidettiin puupelleteillä 5,4-6,4 % (Woodenergy.ie 2014, hakupäivä 1.4.2014), olkipelleteillä 5,8-6,0 % ja ruokohelpipelleteillä 5,6-

5,9 % (Bioenergia Suomessa 2009, hakupäivä 1.4.2014). Näistä laskettiin suurimmalla ja pienimmällä vetypitoisuudella teholliset lämpöarvot saapumistilassa ja niistä puolestaan laskettiin keskiarvot, jotta saatiin vain yksi arvo tehollisesta lämpöarvosta saapumistilassa. Kosteuspitoisuutena puolestaan on käytetty pellettien kosteuspitoisuutta.

TAULUKKO 5. Pellettien tuhkapitoisuuden ja tehollisen lämpöarvon värikoodien raja-arvot

Laatuluokka	Tuhkapitoisuus, %	Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
1.	<0,7	>16,5
2.	0,7-2,5	15,5-16,5
3.	2,5-5,0	14,5-15,5
4.	>5,0	<14,5

TAULUKKO 6. Pellettien tuhkapitoisuuden ja tehollisen lämpöarvon saapumistilassa vertaus laatuluokittelun arvoihin

Raaka-aine	Tuhka- pitoisuus %	Tehollinen lämpöarvo MJ/kg
1.Puru 100%	0,26	
2.Hake 33,3 %/Puru 66,66 %		
3.Hake 33,33 %/Puru 66,66 %	0,54	
4.Puru 100%	0,21	17,51
5.Puru 100%	0,22	16,12
6.Kauran olki 100 %	9,57	13,93
7.Kauran olki 25 %/Puru 75 %	1,23	16,10
8.Kauran olki 50 %/Puru 50 %	2,13	15,00
9.Kauran olki 75 %/Puru 25 %	3,23	14,00
10.Kauran olki 100 %	4,09	13,37
11.Hake 25 %/Kauran olki 75 %	3,09	14,48
12.Hake 50 %/Kauran olki 50 %	2,85	15,14
13.Hake 75 %/Kauran olki 25 %	1,95	15,88
14.Hake 100 %		
15.Hake 50 %/Kauran olki 50 %		14,67
16.Ruokohelpi 100%	4,087	16,08
17.Hake 50 %/Ruokohelpi 50 %		
18.Hake 25 %/Ruokohelpi 75 %	3,424	16,31
19.Puru 50 %/Ruokohelpi 50 %	2,189	16,70
20.Ruokohelpi 74 %/Hake 24 %/Lignosulfonaatti 2 %	4,034	16,00
21.Hake 65 %/Kauran olki 33 %/Lignosulfonaatti 2 %	2,462	16,37
22.Hake 98 %/Lignosulfonaatti 2 %		16,60
23.Hake 95 %/Lignosulfonaatti 5 %	1,589	16,69
24.Hake 100 %	1,178	16,95
25.Puru 100 %	0,341	17,53
26.Hake 100 %		16,42
27.Puru 100 %	0,312	17,36
28.Hake 80 %/Ruokohelpi 20 %	1,589	16,80
29.Hake 80 %/Ruokohelpi 20 %		
30.Ruokohelpi 100 %	4,89	13,72

Tuhkapitoisuudessa 1. luokkaan ylsivät ainoastaan purupelletit. Myös hakepelletit saivat melko hyviä arvoja tuhkapitoisuudesta, vaikka niiden arvot olivatkin vain toisen luokan arvoisia. Sen sijaan ruokohelppi- ja kauran olki pellettien tuhkapitoisuudet jäivät yleensä kolmanteen luokkaan. Toiseen luokkaan ne ylsivät vain silloin, kun vähintään puolet pelletistä oli purua tai haketta.

Teholliselta lämpöarvoltaan laatuvaatimusten mukaisiin arvoihin ylsivät vain puru- ja hakepelletit. Myös hakkeen ja ruokohelven seos ylsi yleensä ensimmäiseen tai toiseen luokkaan. Yksinään ruokohelppi ylsi parhaimmillaan toiseen luokkaan. Kauran olki pelletit puolestaan jäivät yleensä kolmanteen tai neljänteen luokkaan. Vain silloin, kun suurin osa pelletistä oli purua tai haketta niiden lämpöarvo saattoi nousta toiseen luokkaan.

5.2 Johtopäätökset

Yksikään pelletti ei yltänyt puupellettien laatuluokituksen mukaisiin arvoihin kaikilta ominaisuuksiltaan. Lähimmäs pääsi pelkkää purua sisältänyt pelletti 27 jonka mekaaninen kestävyys oli toisessa luokassa. Lähelle kaikkia laatuluokituksia pääsivät myös haketta ja ruokohelpeä sisältänyt pelletti 28, jonka irtotiheys ja tuhkapitoisuus jäivät toiseen luokkaan sekä pelkkää purua sisältänyt pelletti 25, jonka irtotiheys ja mekaaninen kestävyys olivat toisen luokan arvoisia. Myös purusta valmistettu pelletti 1 oli lähes kaikkien laatuluokitusten mukainen, mutta siltä puuttui tehollisen lämpöarvon mittaus ja mekaaninen kestävyys oli toisessa luokassa.

Purupelletit olivat yleensä kokeen pelleteistä parhaita. Ainoastaan mekaanisessa kestävyudessa ja irtotiheydessä purupelletit eivät ihan yltäneet puupellettien laatuvaatimuksiin. Lämpöarvoltaan purupelletit saivat selvästi suurimmat arvot ja niiden tuhkapitoisuuskin oli kokeen pelleteistä selvästi pienin.

Hakepellettien suurimmat ongelmat olivat mekaanisessa kestävydessä sekä irtotiheydessä. Varsinkin pelletit, joissa suurin osa seoksesta oli haketta, saivat matalia arvoja mekaanisesta kestävydestä. Lignosulfonaatin käytöllä sideaineena ei vaikuta olevan merkittävästi mekaanista kestävyttä parantavaa vaikutusta. Sen sijaan poltto-ominaisuuksiltaan hakepelletit ovat purupellettien ohella parhaita.

Kauran olki pelletit eivät ole oikein miltään ominaisuudeltaan hyviä. Niiden kosteuspitoisuudet, tuhkapitoisuudet ja teholliset lämpöarvot ovat kokeen heikoimpia. Mekaaniselta kestävydeltään ja irtotiheydeltään ne ovat ainoastaan hakepellettejä parempia.

Ruokohelpipelletin tulokset olivat erittäin vaihtelevia, sillä välillä mekaaninen kestävyys oli erinomainen ja välillä kokeen heikoin. Samanlaista vaihtelua on havaittavissa myös irtotiheydessä, mutta ei niin suuresti kuin mekaanisessa kestävydessä. Jos mekaaninen kestävyys ja irtotiheys olisivat aina yhtä hyviä kuin mitä ne ovat ruokohelvellä parhaimmillaan, niin ruokohelpi olisi lähes purun veroinen raaka-aine.

Erytisesti on huomioitava hakkeen ja ruokohelven seos, sillä se sai välillä erittäin hyviä tuloksia kaikilta ominaisuuksiltaan, kuten seokset 20 ja varsinkin 28 osoittivat. Näiden kahden raaka-aineen seosta kannattaisikin tutkia enemmän, sillä ne vaikuttaisivat saavan parhaat arvonsa seoksena toistensa kanssa. Myös purun ja ruokohelven seos (19) sai hyviä arvoja.

Sen sijaan kauran olki vaikuttaisi olevan kokeen heikoin raaka-aine. Sen lisäksi, että se kärsi heikohkosta irtotiheydestä, kosteuspitoisuudesta sekä mekaanisesta kestävydestä, se oli myös teholliselta lämpöarvoltaan kokeen heikoin raaka-aine. Parhaiten kauran olki toimi seoksena purun kanssa. Hakkeen kanssa sekoitettuna arvot olivat kauttaaltaan heikkoja. Näiden tulosten valossa kauran olki ei ole erityisen hyvä raaka-aine pelleteille.

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää miten puru, hake, kauran olki sekä ruokohelpi soveltuvat pelletöintiin ja miten nämä pelletit soveltuvat polttoon. Pelletöinti- ja polttokokeet oli tehty aiemmin Ekopelletti T&K –hankkeen puitteissa ja tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin näiden kokeiden tuloksia. Pelleteistä tarkasteltiin irtotiheyttä, kosteuspitoisuutta, mekaanista kestävyyttä, lämpöarvoa sekä tuhkapitoisuutta.

Koska pelletöintikokeet oli toteutettu opinnäytetyön ulkopuolella, ei käsiteltäviin raaka-aineseoksiin päästy vaikuttamaan. Lisäksi luotettavien tulosten saamiseksi pitäisi jokaisesta seoksesta tehdä useampia toistoja mutta nyt päätelmät jouduttiin tekemään vain yhden kokeen perusteella.

Tuloksista havaittiin, että puupelletit ovat varsinkin poltto-ominaisuuksiltaan kauran olki- ja ruokohelpipellettejä parempia. Purupellettien lämpöarvot ja tuhkapitoisuudet olivat polttokokeiden parhaita. Ruokohelpipelletit pääsivät melko lähelle puupellettien lämpöarvoja mutta niillä oli selvästi korkeammat tuhkapitoisuudet. Ongelmaksi monella pelletillä muodostui pellettien rakenteelliset ominaisuudet. Mekaanisesta kestävydestä vain muutama pelletti sai laatuvaatimusten mukaisia arvoja ja irtotiheydenkin laatuvaatimukset osoittautuivat monelle kokeen pelletille liian korkeaksi.

Tutkittavissa raaka-aineissa on kuitenkin potentiaalia tulla yleiseksi pelletin raaka-aineeksi purun rinnalle. Varsinkin hake- ja ruokohelpipelletit saivat sopivilla seoksilla hyviä arvoja kaikista tutkittavista ominaisuuksista. Muutenkin hakkeen ja ruokohelven käyttöä voisi helpottaa ja kuljetuskustannuksia alentaa puristamalla ne pelleteiksi.

Opinnäytetyön myötä olen oivaltanut pelleteissä olevan potentiaalin. Niissä polttoaine on tiiviissä ja helposti käytettävässä muodossa. Ongelmaksi muodostuu usein raaka-aineen pelletöintiin kuluva aika ja energia, mikä tekee niistä irtotavaraa kalliimpaa mutta toisaalta kuljetuskustannukset ovat pelleteillä edullisemmat kuin irtotavaralla.

LÄHTEET

Aalto, M. 2013. Pellettien valmistus ja ohjeistus. Hakupäivä 24.1.2014.
http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/pellettien_valmistus_ja_ohjeistus.pdf

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia.
Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Bioenergia Suomessa. 2009. Oljen ja ruokohelpin ominaisuuksien vertailu.
Hakupäivä 1.4.2014. <http://www.finbioenergy.fi/default.asp?SivuID=9209>

Europa. 2007. Uusiutuvia energialähteitä koskeva etenemissuunnitelma.
Hakupäivä 8.4.2014
http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l27065_fi.htm

Europa. 2014. Vuoteen 2030 ulottuvat ilmasto- ja energiatavoitteet kilpailukykyiselle, varmalle ja vähähiiliselle EU:n taloudelle. Hakupäivä 8.4.2014. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-54_fi.htm

Hyrkäs, J. 2010. Biomassan pelletöinti. Hakupäivä 15.1.2014
http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/pelletti_kirjallisuuskatsaus.pdf

Imppola, R. Takalo-Kippola, H. Pakonen, E. Kylmänen, E. Jokinen & H. Kuokkanen, M. 2013. Ekopelletti – T&K –hanke: Pelletöinti- ja polttokokeet. Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus

Kaurayhdistys. 2010. Kauran tuotanto. Hakupäivä 7.1.2014
<http://www.lumoudukaurasta.fi/miksi-kauraa/kauran-viljely>

Knuuttila, K. & Lötjönen, T. 2009. Pelloilta energiaa – opas ruokohelven käyttäjille. Jyväskylä: Jyväskylä Innovation Oy & Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus.

Kofman, P. 2007. Simple ways to check wood pellet quality. hakupäivä 7.2.2014
<http://www.woodenergy.ie/media/coford/content/publications/projectreports/cofordconnects/ccncheckpelletquality.pdf>

Korpinen, T. 2011. Oljen polton ja mädätyksen vertailu. Hakupäivä 2.4.2014.
<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/73978/nbnfi-fe201201251192.pdf?sequence=3>

Kuitto, P. 2005. Metsästä polttoaineeksi. FINBIO – Suomen Bioenergiayhdistys ry

Kukkonen, M. 2013. Uusien raaka-aineiden hyödynnettävyys pellettilämmitysjärjestelmän polttoaineena. Hakupäivä 18.12.2013.
http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/67595/kukkonen_minni.pdf?sequence=1

Kuokkanen, M., Kolppanen, R. & Kuokkanen, T. 2011 Nesteiden ja kiinteiden aineiden lämpöarvojen määrittäminen. Hakupäivä 15.1.2014.
http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/ekopelletti_info_010911.pdf

Lötjönen, T. 2007. Oljen ja Ruokohelven energiakäytön mahdollisuudet. Hakupäivä 7.1.2014.
<http://www.sedu aikuiskoulutus.fi/loader.aspx?id=e361985c-2cba-43fc-9689-5e3619a43b98>

Metla. 2012. Venäjän pellettituotanto. Hakupäivä 30.1.2014.
<http://www.idanmetsatieto.info/fi/?ID=270&news=view&newsID=2410>

MixBioPells. 2011. Oljen pelletointi FEX-yhtiössä. Hakupäivä 27.2.2014.
http://www.mixbiopells.eu/fileadmin/user_upload/WP3/Best_practices_transl/Finnish/Best_practice_pelletising_BE2020_FI.pdf

Motiva. 2011. Pellettilämmitys. Hakupäivä 11.12.2013.
http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/eri_lammitysmuodot/pellettilammitys

Motiva. 2013. Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Hakupäivä 14.1.2014
http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/biopolttoaineiden_lampoarvoja

Motiva. 2014a. Uusiutuva energia. Hakupäivä 8.4.2014
http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia

Motiva. 2014b. Uusiutuvan energian direktiivi (RES-direktiivi). Hakupäivä 8.4.2014.

[http://www.motiva.fi/taustatietoa/ohjauskeinot/direktiivit/uusiutuvan_energian_direktiivi_\(res-direktiivi\)](http://www.motiva.fi/taustatietoa/ohjauskeinot/direktiivit/uusiutuvan_energian_direktiivi_(res-direktiivi))

Motiva. 2014c. Puuenergian käyttö. Hakupäivä 8.4.2014.

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_kaytto/puuenergian_kaytto

Motiva. 2014d. Energiaa pelloilta. Hakupäivä 8.4.2014.

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/energiaa_pelloilta

Muiste, M. & Habicht, M. 2009. Pellet market country report Baltic countries Estonia / Latvia / Lithuania. Hakupäivä 29.1.2014.

http://pelletsatlas.info/pelletsatlas_docs/showdoc.asp?id=091022144807&type=doc&pdf=true

Mäntyranta, H. 2011. Halpa energia tekee Suomesta pellettien kehitysmaan. Hakupäivä 23.1.2014.

<http://www.forest.fi/smyforest/forest.nsf/allbyid/51CB1A599CBD0FF7C2257935002245F4?OpenDocument>

Obernberger, I. & Thek, G. 2010. The Pellet Handbook. London: Earthscan.

Pahkala, K. Isoahti, M. Partala, A. Suokangas, A. Kirkkari, A. Peltonen, M. Sahramaa, M. Lindh, T. Paappanen, T. Kallio, E. & Flyktman, M. 2005. Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotantoa varten. Jokioinen: MTT

Pelletsatlas. 2014. Country Reports – Sweden. Hakupäivä 23.1.2014
<http://www.pelletsatlas.info/cms/site.aspx?p=10589>

Pelletsatlas. 2014. Country Reports – Denmark. Hakupäivä 23.1.2014.
<http://www.pelletsatlas.info/cms/site.aspx?p=10089>

Pellettienergia. 2013. Pelletin tuotanto. Hakupäivä 11.12.2013.
<http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20tuotanto>

Pellettienergia. 2013. Pellettilämmitys. Hakupäivä 11.12.2013.
<http://www.pellettienergia.fi/Pellettilammitys>

Pellettien laadunmääritys. 2011. Oulun yliopisto & Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Hakupäivä 16.1.2014.
http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/ekopelletti_standardit2.pdf

Pääsky, T. 2011. Miksei pelletti kelpaa? Hakupäivä 23.1.2014.
<http://www.meidantalo.fi/artikkeli/miksei-pelletti-kelpaa>

Rakitova, O. & Ovsyanko, A. 2009. Wood Pellets Production and Trade in Russia, Belarus & Ukraine. Hakupäivä 30.1.2014.
http://pelletsatlas.info/pelletsatlas_docs/showdoc.asp?id=091022144807&type=doc&pdf=true

Ruokatieto yhdistys ry. 2014. Suomalaisia viljakasveja. Hakupäivä 7.1.2014
<http://www.ruokatieto.fi/ruokakasvatus/ruokaketju-ruuan-matka-pelloilta-poytaan/maatila/peltokasvit/suomalaisia-viljakasveja>

SFS-Käsikirja 35-1. 2012. Kiinteät biopolttoaineet. Osa 1: Terminologia, luokitusjärjestelmät ja laadunvarmistus sekä analyysitulosten muuntaminen eri ilmoittamisperustoille. Suomen standardoimisliitto SFS RY.

SFS-Käsikirja 35-2. 2012. Kiinteät biopolttoaineet. Osa 2: Terminologia, näytteenotto ja näytteen esikäsittely, fysikaaliset ja mekaaniset testimenetelmät sekä analyysitulosten muuntaminen eri ilmoittamisperustoille. Suomen standardisoimisliitto SFS RY.

Sweden power chippers AB. Pellettipuristimen PP150 Kompakt käyttöohjeet. Moniste.

Ylitalo, E. 2013. Puupelletit 2012. Hakupäivä 16.12.2013.
<http://www.metla.fi/tiedotteet/metsatilastotiedotteet/2013/puupelletit12.htm>

Woodenergy.ie. 2014. List and values of wood fuel parameters - Part 1. Hakupäivä 1.4.2014.
<http://www.woodenergy.ie/woodasafuel/listandvaluesofwoodfuelparameters-part1/>