

Anni Saaristomaa

Auringonkukkapellettien ominaisuudet ja käyttökokemukset energiantuotannossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinööriytyö

18.1.2018

<p>Tekijä Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Anni Saaristomaa Auringonkukkapellettien ominaisuudet ja käyttökokemukset energiantuotannossa</p> <p>27 sivua 18.1.2018</p>
<p>Tutkinto</p>	<p>Insinööri (AMK)</p>
<p>Koulutusohjelma</p>	<p>Energia- ja ympäristötekniikka</p>
<p>Suuntautumisvaihtoehto</p>	<p>Energiantuotantomenetelmät</p>
<p>Ohjaajat</p>	<p>toimitusjohtaja Yrjö Kumpula lehtori Esa Toukoniitty</p>
<p>Opinnäytetyö on osa suurempaa selvityskokonaisuutta, jonka tavoitteena on kartoittaa auringonkukkapellettien asemaa kivihiilen mahdollisena korvaajana. Opinnäytetyössä oli tavoitteena selvittää auringonkukkapellettien ominaisuuksia sekä tiedustella käyttökokemuksia niiden käytöstä energiantuotannossa.</p> <p>Työssä otettiin selvää auringonkukkapellettien taustasta ja tuotannosta. Lisäksi selvitettiin auringonkukkapellettien keskeisiä ominaisuuksia, joita verrattiin samantyyppisten biomassoista valmistettujen polttoaineiden vastaaviin ominaisuuksiin. Tarkastellut ominaisuudet olivat polttoaineiden rakenne, alkuainekoostumus, tuhkan koostumus ja lämpöarvot. Opinnäytetyössä myös eriteltiin auringonkukkapellettien vahvuuksia ja heikkouksia energiantuotannossa.</p> <p>Auringonkukkapelletit vastaavat suurelta osin puupellettejä ominaisuuksiltaan. Auringonkukkapelletit ovat kuitenkin taloudellinen ja ekologinen vaihtoehto puupelletille, sillä auringonkukkapelletit valmistetaan täysin auringonkukkaöljyntuotannon sivutuotteista. Niitä voidaan käyttää niin kotitalouksien kuin kaupallisten kattiloiden polttoaineena. Auringonkukkapellettejä käytetään erityisesti Itä-Euroopan maissa, joissa on runsaasti auringonkukkaöljyn tuotantoa.</p> <p>Opinnäytetyön selvitystyöhön kuului myös keskeisesti auringonkukkapellettien tuottajien ja käyttäjien haastattelut. Haastatteluista selvisi, että auringonkukkapelletit ovat etenkin Ukrainassa hyvä energianlähde hiilikaivosten sijaitessa sotatantereella ja aurinkoenergian tuottamisen ollessa vielä hyvin kallista. Auringonkukkapellettejä on edullista käyttää erityisesti kattamaan auringonkukkaöljyntuotantolaitosten energiatarve sekä kuljettaa pelletit lähialueelle käytettäväksi.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena syntyi tietopaketti auringonkukkapelleteistä ja kartoitus niiden käyttäjien tiedoista ja kokemuksista. Kartoitusta on syytä vielä jatkaa kattavampien ja mahdollisimman luotettavien tietojen saavuttamiseksi.</p>	
<p>Avainsanat</p>	<p>aurionkukkapelletit, pellettien käyttökokemukset, biomass, biopolttoaine, biopolttoaineiden ominaisuudet, ligniini</p>

Author Title	Anni Saaristomaa Properties and user experiences of sunflower husk pellets
Number of Pages Date	27 pages 18 January 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Engineering
Specialisation option	Energy production technology
Instructors	Yrjö Kumpula, Chief Executive Officer Esa Toukoniitty, Senior Lecturer
<p>The thesis is part of a larger study that aims to chart the position of sunflower husk pellets as a possible substitute for coal. The objective of the thesis was to investigate the properties of sunflower husk pellets and to inquire the user experiences of the pellets in energy production.</p> <p>The thesis studied the background and production of the sunflower husk pellets. In addition, the main properties of sunflower husk pellets were compared with similar properties of biomass fuels of the same type. The properties discussed were fuel structure, elemental composition, ash composition and calorific values. The thesis also analyzed the benefits and weaknesses of sunflower husk pellets in energy production.</p> <p>The vast majority of the sunflower husk pellets' properties are similar to the properties of the wood pellets. However, the sunflower husk pellets are an economic and ecological alternative for wood pellets, as the sunflower husk pellets are made entirely from b-products of sunflower oil production. They can be used as a fuel for household and commercial boilers. The sunflower husk pellets are used especially in eastern European countries as the sunflower oil production is abundant in those areas.</p> <p>The survey part of the thesis also included interviews with the producers and users of the sunflower husk pellets. The interviews revealed that the sunflower husk pellets are a great source of energy, especially in Ukraine where the coal mines are located in the middle of the war zone and the production of the solar energy is still very expensive. The usage of the sunflower husk pellets is utilized to cover the energy needs of sunflower oil production plants and to transport the pellets to be used in nearby areas.</p> <p>The result of the thesis was the information package on the sunflower husk pellets and a survey regarding the knowledge and experiences of the pellets' users. It is still worthwhile to pursue more surveys to achieve more comprehensive and reliable information.</p>	
Keywords	sunflower husk pellets, user experiences of the pellets, biomass, biofuel, the properties of the biofuels, lignin

Sisällys

Lyhenteet ja sanasto

1	Johdanto	1
2	Auringonkukkapelletit	1
2.1	Auringonkukkapellettien taustaa	1
2.2	Auringonkukkapellettien tuotanto	3
2.3	Auringonkukkapellettien ominaisuudet	6
2.3.1	Materiaalien rakenne	9
2.3.2	Materiaalien tekninen analyysi	11
2.3.3	Materiaalien alkuaineanalyysi	12
2.3.4	Tuhkan koostumus	14
2.3.5	Materiaalien lämpöarvot	15
2.4	Auringonkukkapellettien vahvuudet ja heikkoudet energiantuotannossa	18
3	Auringonkukkapelletit kivihiilen korvaajana	19
3.1	Polttoaineiden käyttövolyymit	19
3.2	Polttoaineiden tuntemus	20
3.3	Polttoaineiden ominaisuuksien vertailu	21
3.4	Polttoaineiden hintojen vertailu	22
3.5	Auringonkukkapellettien seospoltto hiilen kanssa	23
4	Auringonkukkapellettien käyttökokemukset	24
4.1	Lux-Oil	24
4.2	Optimus Agro	25
4.3	Klas Oil JSC	26
5	Yhteenveto	26
	Lähteet	28

Lyhenteet ja sanasto

Ar	As received, polttoaine saapumistilassa
Biomassa	Eloperäisiä kasvimassoja, jotka ovat syntyneet fotosynteesin kautta
D	Dry/dry basis, kuiva-aineessa
Daf	Dry ash free, tuhkaton kuiva-aine
HHV	Higher heating value/gross calorific value, ylempi lämpöarvo/kalorimetrinen lämpöarvo
Irtotiheys	Polttoaineen massa kuormatilavuutta kohti
Kiintotiheys	Polttoaineen todellinen tiheys, jossa ei ole mukana edes materiaalin huokosten tilavuutta
Mtoe	Miljoona öljykvivalenttitonni. Energiämäärä, joka vapautuu poltettaessa miljoona tonnia raakaöljyä
Pyrolyysi	Lämpötilan vaikutuksesta tapahtuva hajoamisreaktio
Torrefiointi	Mieto pyrolyysi. Aineen paahtamista 220–300 °C:ssa ilman happea
Wt%, m%	Massaprosentti

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tilaaja on bio energy 1 Oy. Opinnäytetyö toteutetaan osana suurempaa projektikonaisuutta, jossa tutkitaan auringonkukkapellettejä mahdollisena kiivihiilen korvaajana energiantuotannossa. bio energy 1 Oy perustettiin vuonna 2017 ja sen toimitilat ja innovaatiotilat sijaitsevat Inkoossa. be1 on biopolttoaineiden ja -laitteistojen hankintayhtiö, jonka toimittamat polttoaineet täyttävät kestävyyskriteerit.

Auringonkukkapellettejä ei juurikaan käytetä energiantuotantoon Suomessa. Opinnäytetyön tavoitteena onkin kartoittaa auringonkukkapellettien käyttökokemuksia, pellettien ominaisuuksia, laitteita sekä muita ratkaisuja maista ja laitoksista, joissa pelletit ovat olleen käytössä energianlähteenä. Työllä tavoitellaan mm. selvitystä siitä, millaisia haasteita auringonkukkapellettien käyttäjillä on ollut tai miksi auringonkukkapelletit ovat varteenotettava vaihtoehto energiantuotannossa.

Opinnäytetyössä perehdytään auringonkukkapellettien valmistukseen, ominaisuuksiin sekä vahvuuksiin ja heikkouksiin energiantuotannossa. Työssä esitellään auringonkukkapellettien käyttäjien kokemuksia ja arvioidaan työn tulosten merkitystä sekä käyttökelpoisuutta. Yhteenvedo-luvussa luodaan lyhyt katsaus työn kulkuun, tuloksiin ja mahdollisiin ongelmiin, ja arvioidaan tavoitteiden toteutumista.

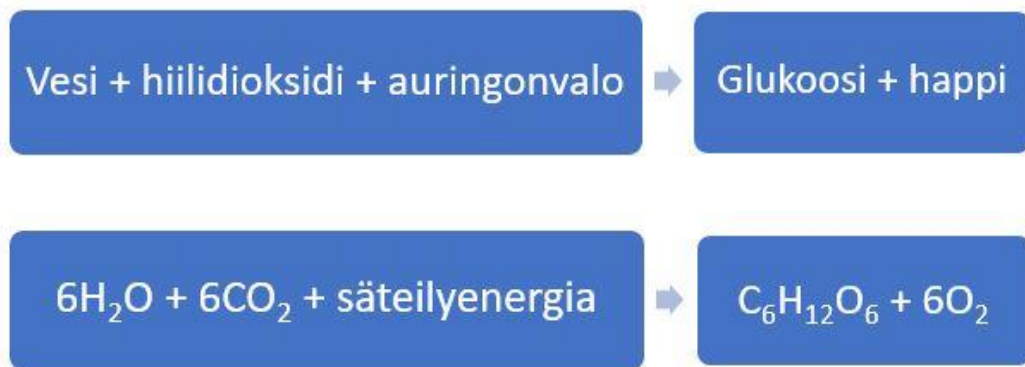
2 Auringonkukkapelletit

Tässä luvussa esitellään auringonkukkapellettien tuotantoa sekä niiden ominaisuuksista, kuten lämpöarvoja ja tuhkapitoisuutta. Luku sisältää myös vertailun auringonkukkapellettien sekä muutaman muun biomassasta valmistettujen pellettien välillä. Lisäksi luvussa arvioidaan auringonkukkapellettien vahvuuksia ja heikkouksia energiantuotannossa sekä kerrotaan mahdollisuuksista pellettien käytöstä seospoltossa hiilen kanssa.

2.1 Auringonkukkapellettien taustaa

Biomassaa syntyy kasvien yhteyttämisprosessissa. Yhteyttämisprosessissa kasvit muuntavat auringon säteilyenergian kemialliseksi energiaksi glukoosin muodossa. Bio-

massojen rakenneosat koostuvat glukoosimonomeereistä. Kuvassa 1 on havainnollistettu tätä prosessia. Auringonkukat ja niiden siemenet luetaan biomassaksi monien muiden eloperäisten kasvimassojen ohella. Auringonkukkapelletit on valmistettu auringonkukkien siementen kuorista. Siementen kuoria syntyy sivuvirtana tuottaessa auringonkukkaöljyä. Materiaali auringonkukkapelletteihin syntyy siis auringonkukkaöljytuotannon sivutuotteena, eikä kuorille ole juuri muuta käyttötarkoitusta. Kuorien ravintoarvot eivät ole proteiinin kannalta edullisia käytettäväksi eläinten ruokana, joten niiden käyttö energiantuotannossa ei vie ravintoa eläimiltä. (Heuzé ym. 2015.)

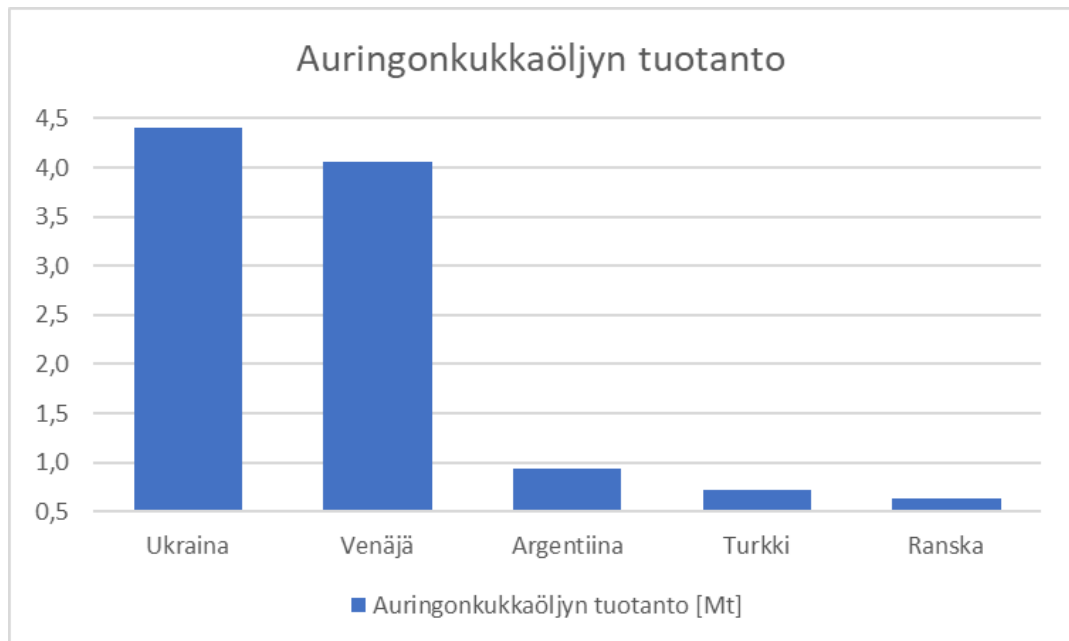


Kuva 1. Yhteyttämisprosessi (Saidur ym. 2011; 2265).

Auringonkukkapelletit ovat taloudellinen, ekologinen ja tehokas vaihtoehto puupelletteihin verrattuna, sillä puupellettien valmistusta varten kaadetaan metsiä. Auringonkukkapellettien käyttö on edullista, erityisesti maissa, joilla on reilusti auringonkukkaöljyn tuotantoa. Auringonkukka- ja puupelleteillä on lähes samat lämpöarvot, joten auringonkukkapelletit ovat hyvin kilpailukykyisiä biopolttoaineiden keskuudessa. Auringonkukkapellettejä käytetään niin kotitalouksissa kuin kaupallisissa kattiloissa kaukolämmön sekä yhdistetyn lämmön ja sähkön tuotantoon. Auringonkukkapellettejä on käytetty voimalaitoksilla mm. Iso-Britanniassa ja Puolassa. Lisäksi esimerkiksi Tanskassa Örsted niminen yhtiö käyttää auringonkukkapellettejä energiantuotantonsa. (Sunflower Husk Pellets; Vares 2017.)

2.2 Auringonkukkapellettien tuotanto

Vuonna 2014 auringonkukkaöljyntuotanto oli globaalisti 15,85 Mt. Auringonkukkaöljyä tuotetaan eniten Itä-Euroopassa sekä Venäjällä. Kuvassa 2 on esitetty viisi suurinta auringonkukkaöljyn tuottajamaata ja niiden tuotantomäärät vuodelta 2014. Kuvasta nähdään, että Ukraina ja Venäjä ovat hyvin merkittävässä roolissa auringonkukkaöljyn tuotannossa. Ukrainan ja Venäjän auringonkukkaöljyntuotantomäärät ovat huomattavasti suurempia kuin kolmanneksi eniten tuottavalla Argentiinalla. Taulukkoon 1 on koottu 10 suurinta auringonkukkaöljyn tuottajamaata ja niiden tuotantomäärät tonneissa. Kuten aikaisemmin on mainittu, auringonkukkapellettien raaka-aineena käytettäviä siementen kuoria syntyy auringonkukkaöljyn tuotannossa. Eli maissa, joissa auringonkukkaöljyä tuotetaan suuria määriä, tuotetaan myös auringonkukkapellettejä eniten. (FAOSTAT 2017.)



Kuva 2. Auringonkukkaöljyn suurimmat tuottajamaat vuonna 2014 (FAOSTAT 2017.)

Taulukko 1. Auringonkukkaöljyn tuotantomäärät maittain vuonna 2014 (FAOSTAT 2017).

	Auringonkukkaöljyn tuotanto [t]
Ukraina	4 400 324
Venäjä	4 063 080
Argentiina	931 700
Turkki	721 882
Ranska	632 900
Unkari	566 100
Espanja	503 500
Romania	454 576
Bulgaria	318 300
Manner-Kiina	299 848

Osa auringonkukkien siementen kuorista käytetään jo öljyntuotantolaitoksella kattamaan laitoksen oma energiantarve. Riippuen laitoksen energiatarpeen suuruudesta sekä tuotannon määrästä, osa öljyntuotannon sivutuotteista voi jäädä yli laitoksen energiatarpeen jälkeen. Tämä ylijäävä osa voi olla hyvinkin suuri. Tässä tilanteessa kuoret on kuljetettava muualle joko energiantuotantoon, kuivikkeeksi tai karjalle heikkolaatuiseksi rehuksi. Kuorien kuljetus on kallista niiden pienen tiheyden takia, joten on kannattavaa valmistaa niistä pellettejä, jolloin kuljetuskustannukset pienenevät huomattavasti. (Heuzé ym. 2015.)

Auringonkukkien siementen kuorista valmistetaan pellettejä, jotka useimmiten valmistetaan auringonkukkaöljyn tuotantolaitosten yhteydessä siihen tarkoitetuilla koneilla. Koneessa kuoria puristetaan suurella voimalla korkeassa lämpötilassa, jolloin saadaan valmistettua sylinterin muotoisia pellettejä. Auringonkukkapelletit ovat helposti säilytettävissä sekä kuljetettavissa. Kuvassa 3 on esimerkki valmiista auringonkukkapelleteistä. Auringonkukkapellettien pituus on n. 10–30 mm ja halkaisija n. 6–10 mm. (Solution for Makin Wood Pellets from Sunflower Husk 2012.)



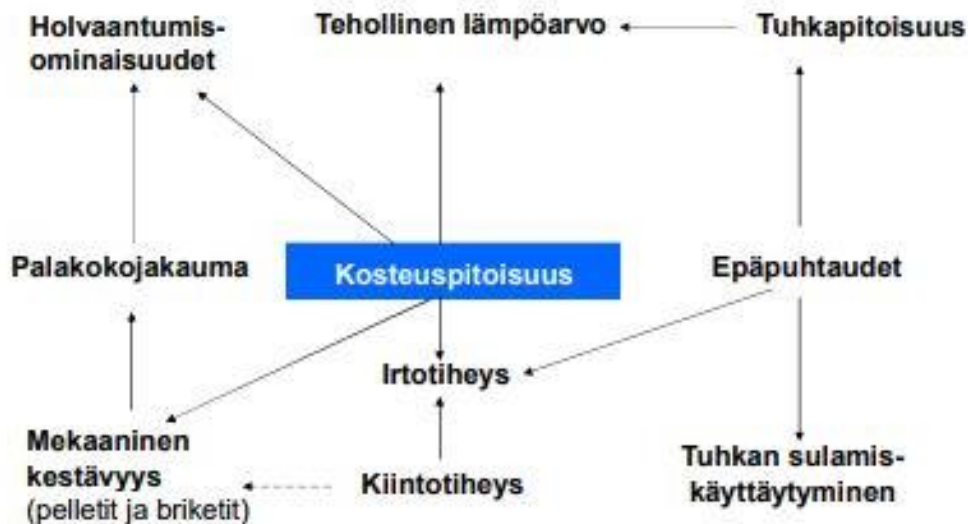
Kuva 3. Valmiita auringonkukkapellettejä (Solution for Making Wood Pellets from Sunflower Husk 2012).

Auringonkukansiementen kuorten kosteuspitoisuus on noin 8–9 %, joten pellettien valmistuslinjassa ei tarvita kuivakäsittelyä. Auringonkukkapellettien valmistus aloitetaan murskaamalla kuoret pienemmäksi esimerkiksi vasaramyllyllä. Murskattujen kuorien sekaan voidaan lisätä esimerkiksi sahanpurua sidosaineeksi, jotta pellettien muodostaminen helpottuisi. Tämän jälkeen materiaali kulkee pelletöintikoneeseen, jossa pelletit valmistetaan suuressa paineessa ja korkeassa lämpötilassa. Pelletit voidaan valmistaa myös matalassa lämpötilassa, mutta tällöin syntyneiden pellettien lämpöarvo on huomattavasti pienempi. Kun materiaalia puristetaan, pehmenee materiaalin ligniini hetkellisesti. Sulanut ligniini muodostaa pelletin pinnalle kiiltävän kerroksen, joka pitää pelletit koossa. Pelletit jäädytetään jäädyttimessä, jossa myös pellettien kosteus pitoisuus pienenee noin 3–4 %:iin. Jäädytyksen jälkeen pelletit seulotaan jauhemaisten materiaalien varalta. Viimeisenä pelletit pakataan, jotta ne eivät pääse kosketuksiin kosteuden kanssa. (Solution for Making Wood Pellets from Sunflower Husk 2012; Sunflower Husk Pellets; Pelletin tuotanto.)

2.3 Auringonkukkuapellettien ominaisuudet

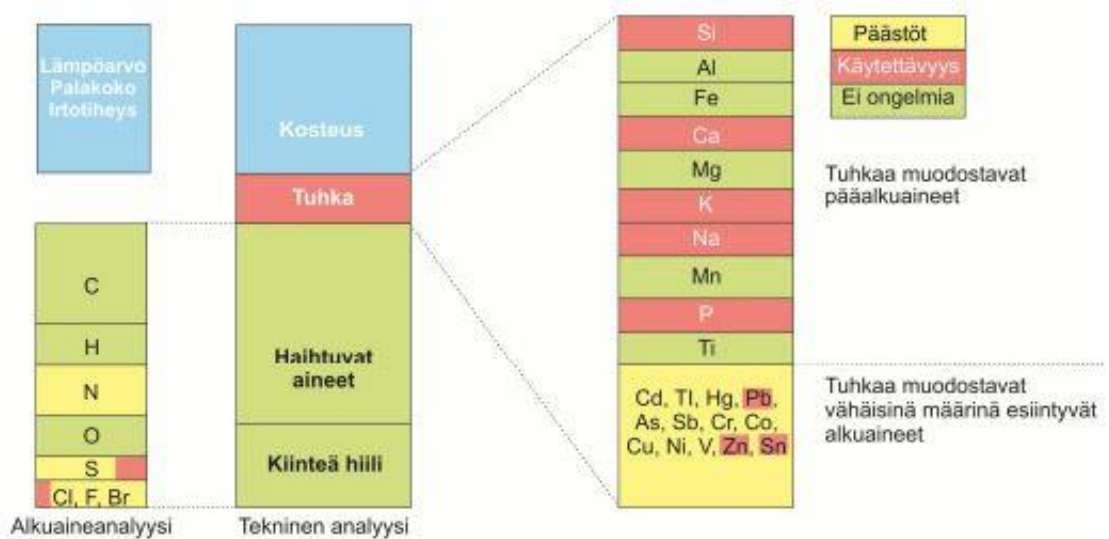
Polttoaineilla on erilaisia ominaisuuksia, jotka on otettava huomioon muun muassa valittaessa energiantuotantolaitoksen laitteita ja suunniteltaessa polttoprosessia. Polttoaineiden ominaisuudet vaikuttavat muun muassa siihen, onko tiettyä polttoainetta järkevää ja kannattavaa käyttää tietyissä olosuhteissa. Esimerkiksi jos polttoaineen kuljetus on kallista, eikä sen lämpöarvo ole kilpailukykyinen edullisemman polttoaineen kanssa, ei tällaista polttoainetta ole kannattavaa valita. Toisena esimerkkinä kannattavamman polttoaineen valitsemisesta on, jos lainsäädännön takia tietyn polttoaineen käytöstä on maksettava paljon, voi olla kannattavampaa valita jokin muu polttoaine.

Polttoaineiden ominaisuuksilla on keskinäisiä riippuvuussuhteita. Kuvassa 4 havainnollistetaan näitä riippuvuuksia. Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ottaa huomioon polttoaineen sisältämän kosteuden alentavan vaikutuksen lämpöarvoon. Lisäksi kosteus kasvattaa savukaasuvirtaa ja pienentää kattilan hyötysuhdetta. Kosteaa polttoainetta voi aiheuttaa ongelmia talvisin polttoaineen syöttölaitteistoissa jäätymisen takia. Kosteus myös vähentää polttoaineen mekaanista kestävyttä. Polttoaineen mekaaninen kestävyys tarkoittaa isku- ja hankautumiskestävyttä käsittelyn ja kuljetuksen aikana. Palakokojakauma vaihtelee polttoaineen ja -tekniikan mukaan. Palakokojakauma puolestaan vaikuttaa palamisprosessin lisäksi kuljetus- ja käsittelylaitteistojen toimintaan, esimerkiksi holvaantumiseen. Tuhkapitoisuus alentaa polttoaineen lämpöarvoa. Tuhkapitoisuutta nostaa polttoaineen epäpuhtaudet kuten metallit, kivet ja muu maa-ainekset. Epäpuhtaudet myös vaikuttavat tuhkan sulamiskäyttäytymiseen. Polttoaineen irto-
tiheyteen vaikuttaa polttoaineen epäpuhtaudet, kosteuspitoisuus ja kiintotiheys. (Alakan-
gas ym. 2016: 196–198.)



Kuva 4. Polttoaineiden ominaisuuksien riippuvuussuhteet (Alakangas ym. 2016: 197).

Kuvassa 5 on Valmet Oyj:n havainnollistava kuva siitä, miten polttoaineiden kemiallisen ominaisuudet vaikuttavat poltossa esiintyviin haasteisiin. Kuvasta nähdään hyvin päästöihin vaikuttavat tekijät niin polttoaineen kuin tuhkan sisältämien aineiden kohdalta. Lisäksi kuvasta nähdään käytettävyyteen vaikuttavat tekijät.



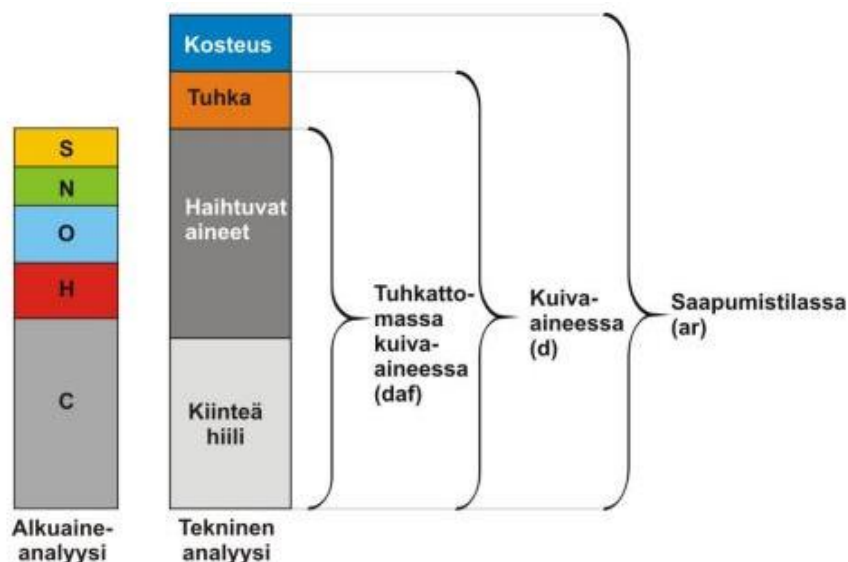
Kuva 5. Alkuaineanalyysin ja teknisen analyysin tulosten yhteys polttoaineen polttoon (Alakangas ym. 2016: 198).

Tässä osiossa käsitellään auringonkukkapellettien polttoon vaikuttavia ominaisuuksia sekä verrataan niitä muihin öljyntuotantokasvien sivutuotteiden vastaaviin ominaisuuksiin. Vertailtavat sivutuotteet ovat

- hasselpähkinän kuoret
- saksanpähkinän kuoret
- mantelin kuoret
- oliivin akanat.

Alkuainekoostumus, tekninen analyysi, lämpöarvo, kosteus ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen ovat tärkeimpiä polttoaineiden määritettäviä ominaisuuksia. Usein on myös selvittävää ympäristötekniistä syistä erilaisten metallien ja epämetallien pitoisuuksia joko polttoaineessa tai sen tuhkassa. Lisäksi on tavallista, että polttoaineista selvitetään tiheys, palakoko sekä muita käsittelytekniisiä ominaisuuksia. Tässä opinnäytetyössä käytetään tutkimustuloksia vuonna 2002 Ayhan Demirbaşin tekemästä tutkimuksesta. (Alakangas ym. 2016: 23.)

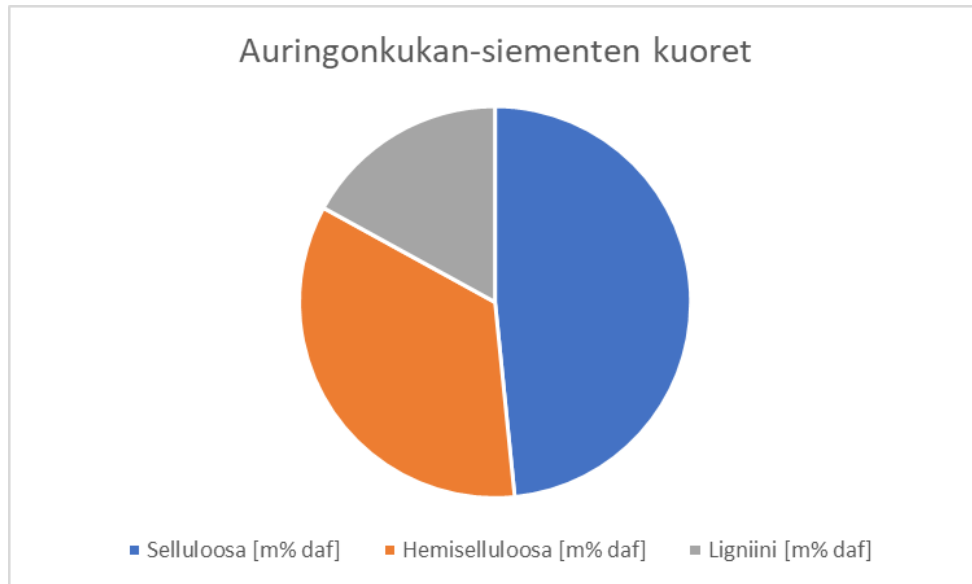
Kuvassa 6 on esitetty polttoaineiden eri määrittysperusteita. Kuvasta nähdään, että polttoaineen alkuaineanalyysissä määritellään polttoaineen hiili-, vety-, happi-, typpi- ja rikkipitoisuuksia. Polttoaineen tekninen analyysi voidaan laskea tuhkattomasta kuiva-aineesta (dry ash free, daf), jolloin tarkastellaan haihtuvia aineita sekä kiinteää hiiltä. Jos teknisessä analyysissä tutkitaan kuiva-ainetta (dry/dry basis, d), otetaan huomioon myös tuhka. Mikäli polttoainetta halutaan tarkastella saapumistilassa (as received, ar), otetaan tarkasteluun mukaan myös polttoaineen kosteus. Esimerkiksi polttoaineen lämpöarvo ilmoitetaan saapumistilassa polttoainekauppaa varten. (Alakangas ym. 2016: 23.)



Kuva 6. Polttoaineiden eri määrittysperusteet (Alakangas ym. 2016: 24).

2.3.1 Materiaalien rakenne

Auringonkukansiemenet, kuten muutkin eloperäiset ainekset, koostuvat selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Kuvassa 7 on kuvaaja auringonkukansiementen kuorien rakenteesta. Kuvassa määrät ovat massaprosentteja tuhkatomassa kuiva-aineessa.



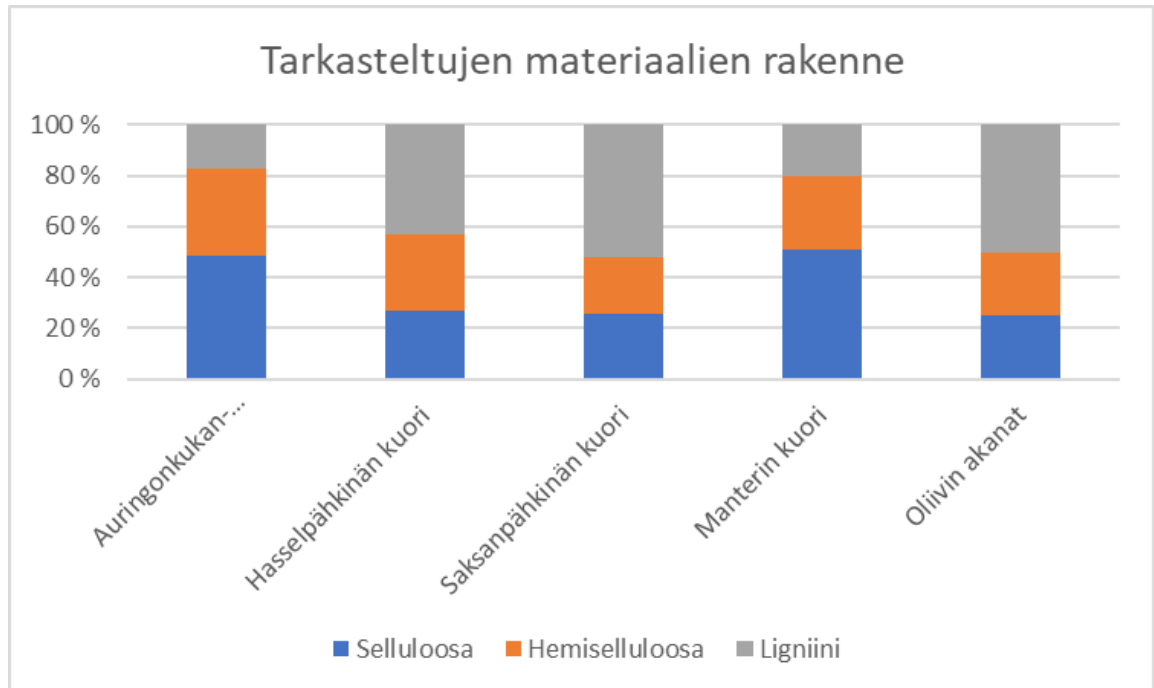
Kuva 7. Auringonkukansiementen kuorien koostumus massaprosentteina tuhkatomassa kuiva-aineessa (Demirbaş 2002: 217).

Selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin pitoisuudet vaikuttavat materiaalin poltto-ominaisuuksiin. Taulukossa 2 on auringonkukkien siementen kuorien sekä vertailtavien biomassojen keskimääräiset koostumukset, jotka on määritelty Ayhan Demirbaşin tutkimuksessa vuonna 2002. Luvut ovat massaprosentteja tuhkatomassa kuiva-aineessa (m% daf).

Taulukko 2. Tarkasteltavien materiaalien keskimääräiset koostumukset massaprosentteina tuhkatomassa kuiva-aineessa, m% daf (Demirbaş 2002: 217).

	Auringonkukan-siemenen kuori	Hasselpähkinän kuori	Saksanpähkinän kuori	Manterin kuori	Oliivin akanat
Selluloosa	48,4	26,8	25,6	50,7	24
Hemiselluloosa	34,6	30,4	22,1	28,9	23,6
Ligniini	17	42,9	52,3	20,4	48,4

Taulukon 2 arvoista on tehty kuvaajat, jotka ovat esiteltyinä kuvassa 8. Kuvasta nähdään selkeästi eri materiaalien koostumusten erot. Auringonkukansiementen kuorissa on kaikista vertailuista materiaaleista vähiten ligniiniä ja eniten hemiselluloosaa. Auringonkukansiementen kuorissa on myös huomattava määrä selluloosaa.



Kuva 8. Kuvaajat vertailtujen materiaalien keskimääräisistä koostumuksista.

Ligniini on sidosaine, joka lisää materiaalin mekaanista lujuutta. Ligniini sitoo biomateriaalin kuidut toisiinsa. Lisäksi ligniini sisältää paljon hiiltä ja vetyä, jotka ovat paljon lämpöä tuottavia aineita. Selluloosa koostuu glukoosimonomeereistä. Selluloosan glukoosimonomeerit muodostavat happiatomien yhdistäminä pitkäketjuisia polymeerejä. Alkuperäisessä selluloosassa arvioidaan polymeerejä olevan n. 20 000. Puun selluloosassa polymeerejä on n. 7 000–10 000. Hemiselluloosa muodostuu useista sokerimonomeereistä ja lisäksi polymeeriketjun rakenne on haaroittunut. (Vanninen 2009: 13; Alakangas ym. 2016: 54; Wikberg & Maunu 2003; 1.)

Taulukkoon 3 on koottu vertailu auringonkukansiementen kuorten ja kuusipuun välille. Taulukossa on vertailtu materiaalien rakenteita sekä ylempiä lämpöarvoja. Polttoaineen ylempi lämpöarvo riippuu paljon polttoaineen rakenteesta. Kuusipuulla on korkeampi ylempi lämpöarvo kuin auringonkukansiementen kuorilla, sillä kuusipuu sisältää enemmän ligniiniä, joka tuottaa palaessaan paljon lämpöä. (Kuittinen 2012: 44.)

Taulukko 3. Auringonkukansiementen kuorten ja kuusipuun rakenteen vertailu (Demirbaş 2002: 217; Kuittinen 2012: 22).

	Auringonkukan- siementen kuoret	Kuusipuu
Selluloosa [m% daf]	48,4	50,8
Hemiselluloosa [m% daf]	34,6	21,2
Ligniini [m% daf]	17,0	27,5
HHV [MJ/kg]	18,0	20,5

Kiinteiden orgaanisten polttoaineiden palaminen alkaa alkulämpenemisellä ja kosteuden haihtumisella. Näiden vaiheiden jälkeen seuraa polttoaineen pyrolyysi. Pyrolysoituminen tarkoittaa kiinteään aineen kaasuuntumista lämpötilan vaikutuksesta. Pyrolyysissä polttoaineen rakenne osat pilkkoutuvat pienemmiksi yhdisteiksi. Kiinteä biopolttaine sytty sen ympärille syntyneiden pyrolyysikaasujen vaikutuksesta. Selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin reaktiivisuudet ovat erilaiset keskenään. Ligniinillä on näistä pienin reaktiivisuus. Biopolttaineiden rakenneosasten kaasuuntumislämpötilat ovat:

- hemiselluloosa 200–350 °C
- selluloosa 250–450 °C
- ligniini 200–500 °C. (Alakangas ym. 2008: 42–43.)

2.3.2 Materiaalien tekninen analyysi

Materiaalien teknisessä analyysissä tarkastellaan yleensä kiinteään hiilen, haihtuvien aineiden, tuhkan sekä kosteuden määrää. Ayhan Demirbaşin tutkimuksessa vuonna 2002 tarkasteltavien materiaalien teknisten analyysien tulokset ovat taulukossa 4. Arvot ovat massaprosentteja tuhkatomassa kuiva-aineessa, joten taulukossa ei ole tarkasteltu aineiden tuhkan tai kosteuden määrää. (Demirbaş 2002: 217; Alakangas ym. 2016: 24.)

Taulukko 4. Materiaalien tekninen analyysi massaprosentteina tuhkatomassa kuiva-aineessa (Demirbaş 2002: 217).

	Auringonkukan- siemenen kuoret	Hasselpähkinän kuoret	Saksanpähkinän kuoret	Mantelin kuoret	Oliivin akanat
Kiinteä hiili	19,8	28,3	37,9	22,7	32,8
Haihtuvat aineet	76,2	70,3	59,3	74,0	63,9
Haihtumattomat aineet	2,7	3,3	2,8	2,5	9,4

Taulukossa 4 on ilmoitettu materiaalien kiinteän hiilen, haihtuvien aineiden sekä haihtumattomien aineiden määrät. Kiinteällä hiilellä tarkoitetaan hiiltä, joka ei poistu palamisprosessissa haihtuvien aineiden kanssa, vaan jää niin kutsutuksi hiiltojäännökseksi. Haihtuvilla aineilla tarkoitetaan orgaanisten aineiden kaasumuodossa poistuvia komponentteja ja hajoamistuotteita, joita polttoaine sisältää. Haihtumattomat aineet ovat muita jäljelle jääviä, haihtumattomia aineita kuin kiinteä hiili. (Alakangas ym. 2016: 9,11.)

Taulukon 4 arvoista voidaan nähdä, että auringonkukansiementen kuorien polttamisesta jää jäljelle kiinteää hiiltä tarkasteltavista materiaaleista pienin määrä. Muita haihtumattomia aineita auringonkukansiemenistä jää suhteellisen vähän. Haihtuvia aineita taas puolestaan auringonkukansiementen kuorista syntyy kaikista suurin määrä.

Haihtuvien aineiden osuudella on merkittävä rooli polton kannalta. Niiden osuus vaikuttaa muun muassa reaktiivisuuteen, palamisprofiliin sekä päästöjen muodostumiseen. Haihtuvien aineiden määrän kasvaminen helpottaa polttoaineen syttymistä ja stabiloi liekkiä pölypoltossa. Haihtuvien aineiden osuudessa kivihielessä ja biopolttoaineissa on merkittävä ero. Biopolttoaineilla osuus on korkea ja kivihielessä alhainen. (Alakangas ym. 2016: 196.)

2.3.3 Materiaalien alkuaineanalyysi

Alkuaineanalyysin avulla tarkastellaan materiaalin hiilen, vedyn, typen, hapen ja rikin määrää. Alkuaineanalyysissä edellä mainittujen aineiden määrä saadaan määritettyä täydellisen polton avulla. Oleellimmat alkuaineet palamisessa vapautuvan energiamäärän kannalta ovat hiili ja vety. Suurin osa polttoaineen sisältämästä tyypestä muuttuu alkuainetypeksi. Siitä huolimatta merkittävä osa tyypestä muodostaa typenoksidipäästöjä. Polttoaineen rikkipitoisuus on oleellisessa roolissa polton päästöjen muodostumisessa sekä tuhkakemiassa. Rikistä voi myös mahdollisesti muodostua rikkihappoa, joka aiheuttaa korroosiota. Voimalaitoksen tulistimien kuumakorroosiota aiheuttaa erityisesti polttoaineen kloori. (Alakangas ym. 2016: 198.)

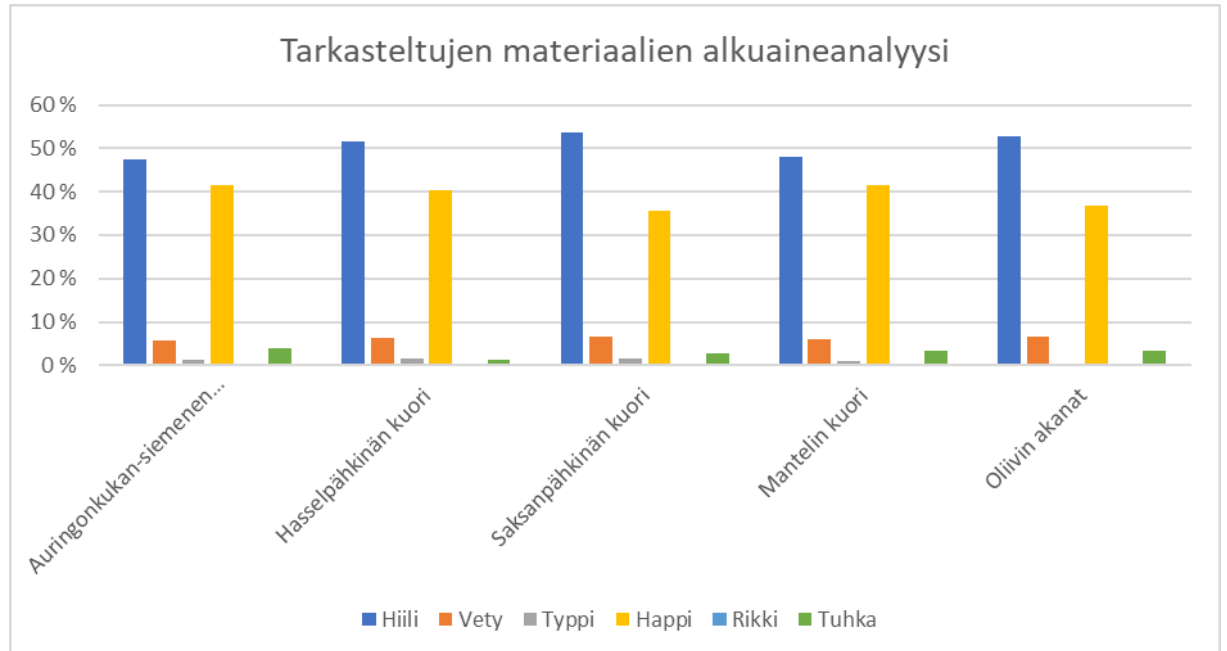
Tässä luvussa käsitellään alkuaineanalyysien lisäksi poltossa syntyvän tuhkan määrää. Taulukossa 5 on aikaisemmin esiteltyjen tarkasteltavien materiaalien alkuaineanalyysit sekä tuhkan määrä. Luvut ovat massaprosentteja kuiva-aineessa. (Alakangas ym. 2016: 24.)

Taulukko 5. Tarkasteltavien materiaalien alkuaineanalyysit massaprosentteina kuiva-aineessa (Demirbaş 2002: 218).

	Auringonkukan-siemenen kuori	Hasselpähkinän kuori	Saksanpähkinän kuori	Mantelin kuori	Oliivin akanat
Hiili	47,4	51,6	53,5	47,9	52,8
Vety	5,8	6,2	6,6	6	6,7
Typpi	1,4	1,6	1,5	1,1	0,5
Happi	41,4	40,2	35,5	41,6	36,7
Rikki	0,05	0,04	0,1	0,06	0,05
Tuhka	4	1,4	2,8	3,3	3,3

Taulukon 5 arvoista tehdyt kuvaajat ovat kuvassa 9. Arvoista voidaan nähdä auringonkukansiementen kuorilla olevan suurin tuhkan määrä. Tuhkan suuri määrä voi vaatia polttoprosessilta erityisiä tuhkanpoistojärjestelmiä, jotta prosessi voi toimia yhtäjaksoisesti ilman säännöllisiä tuhkan poistamiseen tarkoitettuja taukoja. Näin voidaan varmistaa prosessin toiminnalle mahdollisimman suuri tehokkuus.

Hiilen ja vedyn määrä auringonkukansiementen kuorissa on kuitenkin vähäisin muihin materiaaleihin verrattuna. Tätä selittää pienempi ligniinin määrä, sillä ligniini sisältää runsaasti hiiltä ja vetyä. Hapetta auringonkukansiementen kuorissa on suhteellisen paljon.



Kuva 9. Vertailtujen materiaalien alkuaineanalyysien kuvaajat.

2.3.4 Tuhkan koostumus

Aikaisemmissa luvuissa todettiin, että auringonkukansiementen kuorista syntyy tuhkaa eniten verrattuihin materiaaleihin nähden. Tässä luvussa on esiteltynä palamisesta syntyneen tuhkan koostumus. Taulukossa 6 on kerättyä tarkasteltavien materiaalien tuhkan koostumukset massaprosentteina kuiva-aineessa.

Polttoaineen tuhkan koostumus määrittää polton niin kutsuttua tuhkakemiaa. Tuhkakemialla tarkoitetaan polton likaantumis-, kuonaantumis-, korroosio- ja petihiekan agglomeraatiomekanismeja. Esimerkiksi raskasmetallit vaikuttavat tuhkan hyötykäyttöön, haitallisiin päästöihin ja korroosiomekanismeihin. Alkalimetallit taas vaikuttavat kattilan likaantumiseen, tuhkan sulamiseen, korroosioon ja petihiekanjyvästen yhteen liimaantumiseen, eli leijupetihiekan agglomeraatioon. (Alakangas ym. 2016: 198.)

Taulukosta 6 nähdään, että tarkasteltavat tuhkanäytteet koostuvat suurimmiksi osiksi piioksidista, kalsiumoksidista, magnesiumoksidista ja kaliumoksidista. Lisäksi oliivin akanoista syntyy huomattava määrä natriumoksidia. Oliivin akanoista syntyvän tuhkan koostumus on huomattavasti erilainen kuin muiden vertailtujen materiaalien.

Taulukko 6. Tarkasteltavien materiaalien tuhkan koostumus massaprosentteina kuiva-aineessa (Demirbaş 2002: 218).

	Auringonkukan- siemenen kuoret	Hasselpähkinän kuoret	Saksanpähkinän kuoret	Mantelin kuoret	Oliivin akanat
SiO ₂	16,6	27,3	9,9	1,7	29,4
Al ₂ O ₃	2,9	3,1	2,4	2,7	8,4
Fe ₂ O ₃	2,1	3,8	1,5	2,8	6,3
CaO	15,8	15,4	16,6	10,5	14,5
MgO	6,1	7,9	13,4	5,2	4,2
TiO ₂	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
Na ₂ O	1,5	1,3	1,0	1,6	26,2
K ₂ O	35,6	30,4	32,9	48,7	4,3
SO ₃	1,3	1,1	2,2	0,8	0,6
P ₂ O ₅	4,8	3,2	6,2	4,5	2,5
Määrittelemätön	12,7	6,4	13,8	12,4	3,3

Eloperäisten polttoaineiden tuhkaa voidaan käyttää lannoitteena, sillä niiden tuhka sisältää kaikkia keskeisimpiä kasvien ravinteita. Jotta biopolttoaineen poltosta syntyvä tuhka olisi mahdollisimman puhdasta haitta-aineiden osalta. Tuhka sisältää kasvien ravinteita

fosforia ja kaliumia sekä hivenravinteista sinkkiä, kuparia, mangaania, kobolttia ja rautaa. Tuhkan käyttöön lannoitteena on Suomessa asetettu rajoitteita tiettyjen aineiden osalta. Nämä lannoitteiden rajoitteet ovat esitely Eviran sivuilla, jotka näkyvät kuvassa 10. Toisessa sarakkeessa on lannoitteen metsäkäytön rajoitus ja toisessa muun käytön, johon kuuluu pelto- ja puutarhatalous, viherrakentaminen ja maisemointi. (Tuhkan käyttö lannoitteena 2016; Milloin tuhka kelpaa lannoitteeksi? 2011.)

Alkuaine	Metsäkäyttö mg/kg ka.	Muu käyttö mg/kg ka.
Arseni (As)	40	25
Elohopea (Hg)	1,0	1,0
Kadmium (Cd)	25	2,5
Kromi (Cr)	300	300
Kupari (Cu)	700	600
Lyijy (Pb)	150	100
Nikkeli (Ni)	150	100
Sinkki (Zn)	4500	1500

Kuva 10. Tuhkalannoitteiden haitallisten aineiden rajoitteet (Tuhkan käyttö lannoitteena 2016).

2.3.5 Materiaalien lämpöarvot

Lämpöarvo tarkoittaa aineen täydellisessä palamisessa syntyvää lämpöenergiämäärää aineen massayksikköä kohti. Lämpöarvot ilmoitetaan yleensä yksikössä MJ/kg. Polttoainneiden lämpöarvo voidaan ilmoittaa eri tavoin. Lämpöarvo voidaan ilmoittaa kalorimetrisellä lämpöarvolla, tehollisena lämpöarvona kuiva-aineessa ja tehollisena lämpöarvona saapumistilassa. Tässä luvussa esitellään nämä kolme yleisintä lämpöarvon ilmoitustapaa, sekä tarkastellaan auringonkukansiementen kuorten ja vertailtavien biomassojen lämpöarvoja. (Kuokkanen ym. 2011.)

Kalorimetrinen lämpöarvo on toiselta nimeltään ylempi lämpöarvo (eng. higher heating value/HHV). Ylempi lämpöarvo tarkoittaa lämpöenergian määrää aineen massayksikköä kohti, joka vapautuu aineen palaessa täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät 25 °C:een.

Tässä lämpöarvossa oletetaan sekä aineen kosteuden, että vedyn palamistuotteena syntyvän veden olevan nestemäisessä muodossa. (Alakangas ym. 2016: 28.)

Ylemmän lämpöarvon sijaan Suomessa käytetään yleisemmin kuiva-aineen tehollista lämpöarvoa, jota kutsutaan myös alemmaksi lämpöarvoksi. Tässä lämpöarvossa oletetaan aineen sisältämän vedyn palamistuotteena syntyvä veden ja aineen sisältämän veden olevan palamisen jälkeen vesihöyryä. Alemmassa lämpöarvossa on siis huomioitu palamisen yhteydessä höyrystyvän veden höyrystämiseen kuluva lämpömäärä. Alempi lämpöarvo saadaan laskettua ylemmästä lämpöarvosta muunnoskaavan avulla. Alempi lämpöarvo saadaan määriteltä kaavan 1 mukaisesti. (Alakangas ym. 2016: 28; Kuokkanen ym. 2011.)

$$q_{p,net,d} = q_{v,gr,d} - 0,02441 \text{ MJ/kg} \times H\% \times \left(\frac{18,015 \text{ u}}{2,016 \text{ u}} \right) \quad (1)$$

jossa

$q_{p,net,d}$ on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakiopaineessa, MJ/kg

$q_{v,gr,d}$ on kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakiotilavuudessa, MJ/kg

0,02441 MJ/kg on korjaustekijä, joka aiheutuu veden höyrystymislämmöstä vakio tilavuudessa (+25 °C)

$H\%$ on polttoaineen sisältämä vedyn määrä prosentteina

18,015 u on veden (H₂O) molekyylipaino

2,016 u on vedyn (H₂) molekyylipaino. (Kuokkanen ym. 2011.)

Kolmas tapa ilmoittaa polttoaineen lämpöarvo on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Kyseinen lämpöarvo on käsitellyistä arvoista alhaisin. Tämä johtuu siitä, että arvoa laskettaessa siitä on vähennetty energiamäärä, joka käytetään polttoaineen kosteuden sekä palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen. Polttoainekaupassa käytetään yleensä polttoaineen tehollista lämpöarvoa saapumistilassa.

Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa voidaan laskemalla selvittää, kun tunnetaan tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa sekä polttoaineen kosteus saapumistilassa. Tehollisen lämpöarvon saapumistilassa lasketaan kaavan 2 mukaisesti. (Alakangas ym. 2016: 28.)

$$q_{p,net,ar} = q_{p,net,d} \times \left(\frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0,02443 \text{ MJ/kg} \times M_{ar} \quad (2)$$

jossa

$q_{p,net,ar}$ on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg

$q_{p,net,d}$ on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakiotilavuudessa, MJ/kg

M_{ar} on polttoaineen kosteus saapumistilassa, p%

0,02443 MJ/kg on höyrystymisen entalpian korjauskerroin vedelle 25 °C:n lämpötilassa. (Kuokkanen 2011.)

Opinnäytetyössä jo aikaisemminkin tarkastellussa Demirbaşin tutkimuksessa on määritetty erilaisten biopolttoaineiden ylempiä lämpöarvoja. Nämä ylemmät lämpöarvot ovat taulukossa 7. Taulukon arvot ovat ilmoitettu yksikössä MJ/kg.

Taulukko 7. Tarkasteltavien biopolttoaineiden ylemmät lämpöarvot yksikössä MJ/kg (Demirbaş 2002: 218).

	Auringonkukan- siemenen kuori	Hasselpähkinän kuori	Saksanpähkinän kuori	Manterin kuori	Oliivin akanat
HHV (MJ/kg)	18	20,2	21,6	18,8	20,9

VTT on kartoittanut erilaisten puupellettien ominaisuuksia mukaan lukien niiden ylemmät lämpöarvot. Tutkimuksessa tarkasteltujen pellettien lämpöarvot vaihtelevat välillä 17,68–21,99 MJ/kg riippuen pellettien materiaaleista, puulajista ja torrefioinnista. Kun taulukon 7 arvoja verrataan mainittujen puupellettien ylempiin lämpöarvoihin, nähdään taulukon biopolttoaineiden olevan hyvin kilpailukykyisiä lämpöarvojensa puolesta. Kevyen polttoöljyn ylempi lämpöarvo on noin 42 MJ/kg, eli auringonkukkapelleteillä ylempi lämpöarvo on noin puolet pienempi. (Wilén ym. 2013: 29; Kuokkanen ym. 2011: 6.)

Kaavalla 1 laskemalla taulukoiden 5 ja 7 arvoista saadaan auringonkukansiementen kuorille alemmaksi lämpöarvoksi eli teholliseksi lämpöarvoksi 16,735 MJ/kg. Alemman lämpöarvon avulla voidaan määrittää tehollinen lämpöarvo polttoaineen saapumistilassa kaavalla 2. Auringonkukkapellettien kosteus vaihtelee toimittajista ja olosuhteista riippuen, usein 5–10 % välillä. Jos kosteuspitoisuudeksi valitaan 8 %, saadaan kaavalla 2 teholliseksi lämpöarvoksi saapumistilassa laskettua 15,20076 MJ/kg. Näillä tiedoilla selvitettyt lämpöarvot auringonkukansiementen kuorille ovat siis:

- Ylempi lämpöarvo: 18,0 MJ/kg
- Alempi lämpöarvo: 16,735 MJ/kg
- Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa: 15,20076 MJ/kg.

2.4 Auringonkukkapellettien vahvuudet ja heikkoudet energiantuotannossa

Yksi auringonkukkapellettien vahvuuksista on niiden ympäristöystävällisyys. Kun auringonkukkapellettejä poltetaan, syntyy palamisesta hiilidioksidipäästöjä saman verran kuin biomassan luonnollisen hajoamisen aikana. Käytännössä auringonkukkapellettien käyttö vähentää myös maatalousjätettä. Lisäksi auringonkukkapelleteillä on korkea lämpöarvo, joten ne ovat polttoaineena hyvin kilpailukykyisiä niin muihin biopolttoaineisiin kuin fossiilisiin polttoaineisiin nähden. (Solution for Making Wood Pellets from Sunflower Husk 2012; Saidur ym 2011: 2268.)

Auringonkukkapelleteillä on myös hyvä kestävyys. Ne ovat kovia ja helposti kuljetettavissa. Lisäksi auringonkukkapellettejä käytetään usein paikallisesti lähellä niiden tuotantolaitoksia, joten kuljetuskustannukset ovat tällöin pienempi. Tällaisissa tilanteissa voi hyvin todennäköisesti tulla halvemmaksi valita pelletit kuin esimerkiksi jokin fossiilinen polttoaine. Tällöin ei kuljetuksestakaan synny suuria määriä ympäristölle haitallisia päästöjä. (Solution for Making Wood Pellets from Sunflower Husk 2012.)

Auringonkukansiementen kuoria käytetään eläinten ravinnoksi vain hyvin vähän niiden huonojen ravintoarvojen takia, joten niiden käyttäminen energiantuotannossa ei ole eläinten ravinnosta pois. Auringonkukkapellettien raaka-aineet ovat auringonkukkaöljyntuotannon sivutuote, joten pellettejä varten ei tarvitse viljellä pelloille enempää auringonkukkaa. On myös tutkittu mahdollisuutta käyttää auringonkukkapellettien polttamisesta syntyvää tuhkaa lannoitteena, sillä se sisältää kaikki kasveille hyödylliset ravinteet. Näiden pellettien tuotanto ei siis vaadi suuria hakkuita. Auringonkukkapelletit ovat myös monipuolinen polttoaine, sillä niitä voidaan käyttää niin kotitalouksissa kuin suuremmillakin energialaitoksilla. Lisäksi auringonkukkapellettejä voidaan polttaa kattilassa yksin tai esimerkiksi hiilen kanssa. (Heuzé ym. 2015; Saidur ym 2011: 2268; Sunflower Husk Pellets 2017.)

Auringonkukkapellettien käytön suurin ongelma on niiden suhteellisen korkea pölypitoisuus. Korkea pölypitoisuus tarkoittaa, että materiaalissa on paljon hyvin pieniä hiukkasia, josta aiheutuu materiaalin huonompi mekaaninen kestävyys. Lisäksi polttoaineen korkea pölypitoisuus vaatii polttolaitokselle tehokkaan tuhkanpoistojärjestelmän. Toinen auringonkukkapellettien ongelma voi olla niiden pienempi irtotiheys verrattuna muihin kiinteisiin polttoaineisiin. Irtotiheydellä tarkoitetaan polttoaineen massaa kuormatilavuutta kohti. Polttoaineen pienempi irtotiheys aiheuttaa kuljetusmaksujen suurenemisen. (Sunflower Husk Pellets; Alakangas ym. 2016: 10.)

Auringonkukkapelleteiden yksi haittapuolista on niiden rakka-aineiden kausiluontoisuus. Raaka-aineita saadaan vain silloin kun auringonkukansiemenet kerätään öljyntuotantoa varten. Alun perin maatalousjätteet ovat olleet edullisia, sillä ne ovat olleet vain sivuvirta, jolle ei välttämättä ole ollut käyttöä. Nykyään auringonkukkapelletit muiden biopolttoaineiden tapaan ovat kallistuneet huomattavasti kasvaneen kysynnän takia. (Biomass Compared to Fossil Fuels, Solar and Wind 2017.)

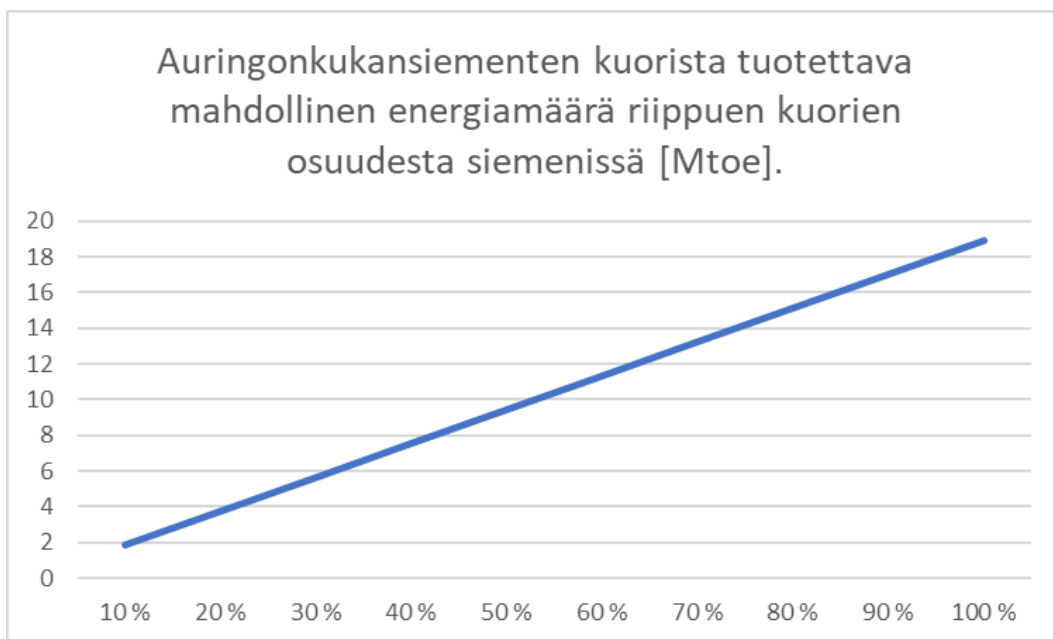
3 Auringonkukkapelletit kivihiilen korvaajana

Tässä luvussa arvioidaan auringonkukkapellettien käytön mahdollisuuksia kivihiilen korvaajana. Luvussa tarkastellaan sekä kivihiilen että auringonkukkapellettien keskeisiä ominaisuuksia energiantuotannon kannalta. Lisäksi verrataan näiden polttoaineiden kannattavuutta taloudellisesta näkökulmasta. Lopuksi esitellään mahdollisuutta näiden polttoaineiden seospolttoon.

Biomassa eroaa kivihilestä monilla tavoilla muun muassa orgaaniselta ja epäorgaaniselta sisällöltään, energiasisällöltään ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan. Nämä ominaisuuksien eroavaisuudet vaikuttavat hiilen korvaamiseen biomassalla ja niiden seospolttoon. Jotta biomassan käyttö sujuisi tulevaisuudessa ongelmitta ja tehokkaasti, on lisätutkimusta tehtävä. Lisätutkimuksen avulla saadaan parannettua kattiloiden, materiaalien sekä polttotekniikoiden suunnittelua. (Saidur 2011; 2287.)

3.1 Polttoaineiden käyttövolyymit

Kivihiltä käytettiin vuonna 2016 koko maailmassa 3784,7 Mtoe (BP Statistical Review of World Energy 2016: 39). Auringonkukansiemeniä tuotettiin koko maailmassa 47,35 miljoonaa tonnia vuonna 2016 (FAOSTAT 2017). Energiamäärä, joka auringonkukansiementen kuorista saadaan tuotettua, riippuu siitä, kuinka suuri osuus siemenissä on kuorta. Energiamäärä riippuu kuorten prosenttiosuudesta lineaarisesti, mitä esitetään kuvassa 11. Kuvaajasta nähdään, että vaikka kuorten osuus sementen massasta olisi 100 %, ei niistä saatava energiamäärä riitä mitenkään korvaamaan hiilen käyttöä.



Kuva 11. Auringonkukansiementen kuorista tuotettava mahdollinen energiamäärä riippuen kuorien osuudesta siemenissä.

Käytettäessä auringonkukansiementen kuorien alempaa lämpöarvoa, joka on laskettu aikaisemmin olevan 16,735 MJ/kg, ja arvioitaessa kuorten prosenttiosuudeksi siemenissä 30, saadaan niiden polttamisesta syntyväksi energiamääräksi n. 237 695 753 GJ. Kun tämä kerrotaan muuntokertoimella 0,02388, saadaan energiamääräksi 5,68 Mtoe (Alakangas 2016: 21). Hiilen ja auringonkukansiementen kuorien energiamäärät ovat:

- Kivihiili: 3784,7 Mtoe
- Auringonkukansiementen kuoret: 5,68 Mtoe.

Näistä luvuista huomataan, ettei auringonkukkapelleteillä ole mahdollista korvata käytettävää kivihiiltä, sillä auringonkukansiementen kuorten energiamäärä on vain noin 0,15 % käytettävän kivihiilen energiamäärästä. Osa kivihiilestä kuitenkin voidaan korvata auringonkukkapelleteillä, ja mahdollisuus kivihiilen korvaamiseksi kasvaa, kun otetaan huomioon muut maatalousjätteiden biomassat sekä muut biopolttoaineet.

3.2 Polttoaineiden tuntemus

Kivihiili on ollut energiantuotannossa käytössä jo pitkään, joten sen käyttöön liittyvät tekniikat ja ominaisuudet ovat hyvin tunnettuja. Auringonkukkapelletit ovat puolestaan melko uusi energianlähde, joten sen käytön ongelmat ja ratkaisut eivät ole vielä tuttuja.

Kun tällaista uutta energianlähdettä harkitaan käytettäväksi, on hyvä pohtia prosessiin liittyen mm. seuraavia kysymyksiä:

- Kuinka korkealta polttoaine ruiskutetaan polttokammiossa?
- Millaisia ongelmia tuhkasta tai muusta jätteestä aiheutuu?
- Millaisia muutoksia polttimissa tarvitaan?
- Miten polttoaine kuljetetaan laitokselle ja sen sisällä?
- Millaisia polttoaineen varastointiin liittyviä ongelmia voidaan odottaa?
- Kuinka säännöllistä polttoaineen tarjontaa on? (Saidur 2011; 2266.)

3.3 Polttoaineiden ominaisuuksien vertailu

Taulukossa 8 on auringonkukansiementen kuorien sekä erään venäläisen kivihiilen alkuaineanalyysit. Taulukon arvot ovat massaprosentteja kuiva-aineessa. Polttoaineiden alkuaineanalyseistä nähdään selvä ero hiilen ja hapen määrissä. Kivihiilessä on enemmän hiiltä kuin auringonkukansiementen kuorissa, kun taas auringonkukansiementen kuorissa on paljon enemmän happea. (Demirbaş 2002: 218; Alakangas ym. 2016: 173.)

Taulukko 8. Auringonkukansiementen kuorien ja kivihiilen alkuaineanalyysit (Demirbaş 2002: 218; Alakangas ym. 2016: 173.)

	Auringonkukan- siementen kuori	Kivihiili
Hiili	47,00 %	66,19 %
Vety	6,00 %	4,73 %
Typpi	1,00 %	2,12 %
Happi	41,00 %	14,08 %
Rikki	0,05 %	0,38 %

Lämpöarvojen kannalta hiili ja vety ovat keskeisimmät polttoaineen sisältämät alkuaineet. Näitä on kivihiilessä enemmän kuin auringonkukan siementen kuorissa, mikä huomataan myös tarkastellessa näiden materiaalien tehollisia eli alempia lämpöarvoja. Erään venäläisen kivihiilen alempi lämpöarvo on keskiarvolta 28,15 MJ/kg, mikä on huomattavasti suurempi kuin auringonkukansiementen kuorien alempi lämpöarvo 16,735 MJ/kg. (Alakangas ym. 2016: 173.)

Auringonkukansiementen kuorien tuhkapitoisuus on 4 % kuiva-aineessa ja kivihiilen 12,5 % kuiva-aineessa. Polttoaineiden tuhkapitoisuus vaikuttaa esimerkiksi alentavasti polttoaineen lämpöarvoon sekä asettaa vaatimuksia tuhkan käsittelylaittoiston kapasiteetille. Bio- ja jätteperäisten polttoaineiden epäpuhtaudet kuten metallit ja maa-aines, nostavat polttoaineiden tuhkapitoisuutta. Auringonkukansiementen kuorien ja jauhetun kivihiilen tuhkan koostumukset on esitetty taulukossa 9. (Demirbaş 2002: 218; Alakangas ym. 2016: 179.)

Taulukko 9. Auringonkukansiementen kuorien ja jauhetun kivihiilen koostumukset painoprosenteina (Demirbaş 2002: 218; Alakangas ym. 2016: 179.)

	Auringonkukan- siemenen kuoret	Jauhettu kivihiili
SiO ₂	16,6	50,2
Al ₂ O ₃	2,9	16,9
Fe ₂ O ₃	2,1	8,9
CaO	15,8	11,5
MgO	6,1	3,5
TiO ₂	0,1	0,8
Na ₂ O	1,5	1,8
K ₂ O	35,6	1,7
SO ₃	1,3	4,3
P ₂ O ₅	4,8	0,1

Merkittävimmät vertailtujen tuhkien koostumusten erot ovat piioksidin (SiO₂), alumiinioksidin (Al₂O₃) ja kaliumoksidin (K₂O) osuuksissa. Erityisesti alkalimetallit (K, Na) aiheuttavat kattilan likaantumista, vaikuttavat tuhkan sulamiseen ja korroosioon. Kaliumia (K) on huomattavan paljon auringonkukansiementen kuorissa. (Alakangas ym. 2016: 198.)

3.4 Polttoaineiden hintojen vertailu

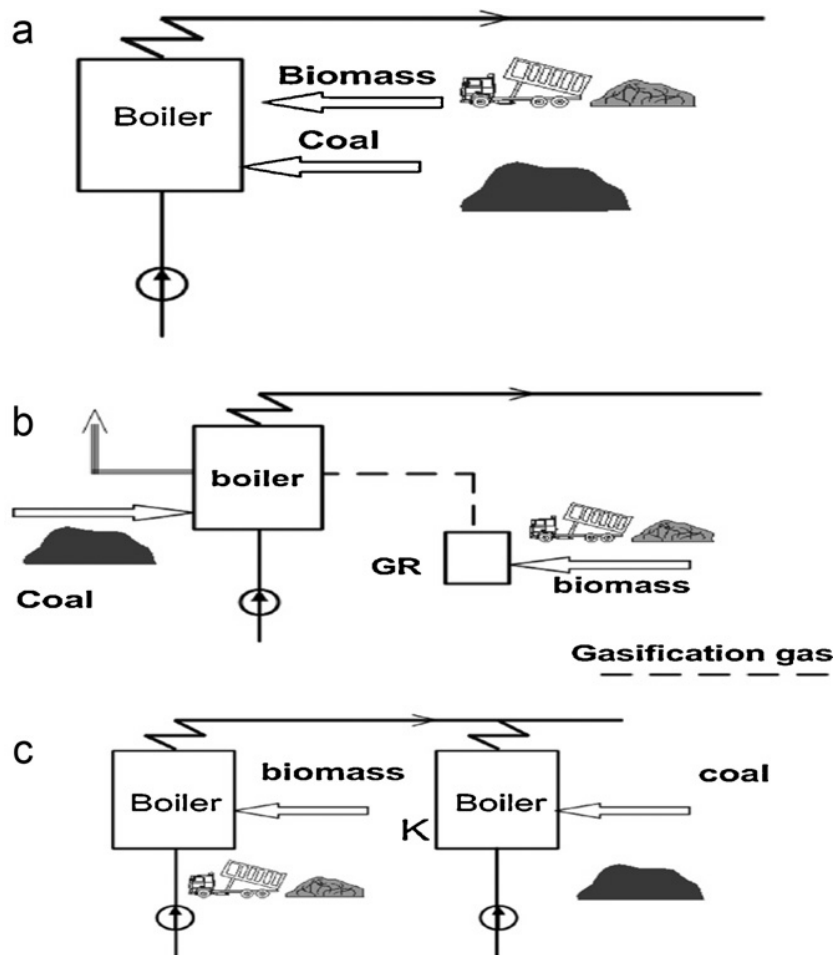
Vuonna 2016 kivihiilen hinta luoteis-Euroopassa oli keskiarvolta 59,87 €/tonni (Coal Prices 2018). Auringonkukkapellettien hinta vaihtelee paljon toimittajista riippuen. Global-Agro Group myy auringonkukkapellettejä edulliseen hintaan, 32 €/tonni. Ukrainan biopolttoaine portaalissa auringonkukkapellettien hinnat vaihtelevat arviolta välillä 50–70 €/tonni. (Sunflower Husk Pellets; Ukrainian Biofuel Portal 2018.)

On syytä huomioida, että polttoaineiden hintaa lisää huomattavan paljon niiden kuljetusmaksut. Vaikka auringonkukkapellettejä on mahdollista saada halvemmalla kuin kivihiiltä, pellettien lämpöarvo on paljon pienempi kuin kivihiilellä. Toisin sanoen, auringonkukkapellettejä tarvitaan määrällisesti enemmän kuin kivihiiltä kattamaan sama energiantarve, joten pellettien kuljetusmaksut ovat suuremmat.

3.5 Auringonkukkapellettien seospoltto hiilen kanssa

Auringonkukkapellettejä voidaan myös polttaa hiilen seassa. Tällöin osa käytetystä hiilestä saadaan korvattua pelleteillä, ja polttoprosessin haitalliset ympäristöpäästöt vähenevät. Pellettien käyttö vähentää typen oksidien ja hiilidioksidin päästöjä. Lisäksi ympäristöön maaperään ja vesistöön siirtyvät myrkyt vähenevät pellettien polton myötä. (Saidur ym. 2011; 2278.)

Auringonkukkapellettien ja ylipäätään biomassan seospolttoon hiilen kanssa on pääasiassa kolme tekniikkaa, jotka ovat esitettynä kuvassa 12. Kuvan a-vaihtoehto tarkoittaa suoraa seospolttoa, jossa hiili ja biomassa sekoitetaan polttoaineenkäsittelyjärjestelmässä, ja sieltä seos syötetään poltettavaksi kattilaan. Tämä on yleisimmin käytössä oleva tapa seospolttoon. b-vaihtoehdossa hiiltä ja biomassaa poltetaan rinnakkain, ja polttoaineilla on oma polttoaineensyöttöjärjestelmä. c-vaihtoehdossa biomassa ja hiili poltetaan erillisissä kattiloissa. (Saidur ym. 2011; 2278.)



Kuva 12. Vaihtoehdot biomassan ja hiilen seospoltolle (Saidur ym. 2011; 2279).

4 Auringonkukkapellettien käyttökokeemukset

Opinnäytetyössä tavoitteena oli olla yhteydessä auringonkukkapellettien energiakäyttäjiiin ja kartoittaa heidän käyttökokeuksiaan pellettejä koskien. Yhteydenotot aloitettiin auringonkukkaöljyntuotantoyhtiöistä, joilta tiedusteltiin yhtiöiden suurimpia energia-asiakkaita sekä heidän omia käyttökokeuksiaan. Tässä luvussa esitellään haastatellut auringonkukkapellettien käyttäjät sekä esitellään heidän antamia tietoja ja käyttökokeuksia pellettien käytöstä.

4.1 Lux-Oil

Lux-Oil on Ukrainassa toimiva auringonkukkaöljyn sekä muiden auringonkukista valmistettävien tuotteiden tuottaja, mukaan lukien auringonkukkapellettit. Yhtiön toiminta alkoi

pienestä liikkeestä, jonka tuotteet oli tuotettu vanhentuneella kalustolla. Nykyään Lux-Oilin Sophiyivkassa sijaitsevalla öljyntuotantolaitoksella on nykyaikaiset varusteet, joilla saadaan taattua laadukkaiden tuotteiden tarjonta. Lux-Oilin haastatteluun vastasi yhtiön myynti-osaston Serhii Gekalo. Haastattelu tehtiin sähköpostin väityksellä. (Lux-Oil.)

Gekalo kertoi yhtiön suurimpien auringonkukkapelletti-asiakkaiden olevan laitokset, joilla tuotetaan esimerkiksi majoneesia, sinappia ja ketsuppia sekä lämpöä tuottavat lämpö-laitokset. Lisäksi hän kertoi, että monet yksityishenkilöt ostavat Lux-Oililta pellettejä kiinteistöjensä lämmittämiseksi. Hän kertoi, että aikaisemmin lämmitykseen käytettiin pääasiassa maakaasua ja hiiltä. (Gekalo 2017.)

Haastattelussa Gekalo kertoi myös, miksi pellettejä käytetään nykyään enemmän. Hänen mukaansa hiilestä on pulaa, sillä itäisessä Ukrainassa käydään tällä hetkellä sotia. Hänen kertoman mukaan, kaikki ovat alkaneet ymmärtää hiilen olevan menneisyyttä, ja ettei kukaan tule korjaamaan Donbassissa sijaitsevia hiilikaivoksia. Gekalo kertoo aurinkoenergian olevan tällä hetkellä liian kallista massamarkkinoille. Näistä syistä hänen mukaansa auringonkukkapelletit ovat tällä hetkellä suosiossa. (Gekalo 2017.)

4.2 Optimus Agro

Optimus Agro on Ukrainassa sijaitseva yhtiö, joka tuottaa pääasiassa auringonkukkaöljyä. Sen lisäksi yhtiö myy öljyntuotannon sivutuotteita. Optimus Agro kuuluu Ukrainan viiteen kärkiyhtiöön auringonkukansiementen prosessoijana asennetun kapasiteetin mukaan. Yhtiöllä on asiakkaita niin Ukrainassa kuin ulkomaillaakin. Haastatteluun, joka tehtiin sähköpostin välityksellä, vastasi Optimus Agron kaupallinen johtaja Igor Bazylievych. (Optimus Agro 2016.)

Optimus Agro tuottaa omilla laitoksillaan energiaa auringonkukkapelleteillä. Kaikki heidän tuottamansa energia menee yhtiön omaan käyttöön, sillä heidän kulutuksensa on niin suuri. Yhtiö käyttää pellettien polttamiseen ukrainalaisia kattiloita. Optimus Agro myy auringonkukkapellettejä useille eri asiakkaille. Heidän yksi suuri asiakasmaa on Puola, jossa suuri energiayhtiö käyttää Optimus Agron tuottamia pellettejä energian tuotantonsa. (Bazylievych 2017.)

Haastatellun Bazylievychin mukaan Optimus Agrolla on ollut pääasiassa yksi hankaluus auringonkukkapellettien käytössä energian tuotannossa. Haasteena on ollut, että pellettien poltossa on oltava tehokas tuhkanpuhdistusjärjestelmä. Hyvällä järjestelmällä voidaan taata prosessin yhtäjaksoinen toiminta ilman säännöllistä pysähdystä tuhkan puhdistamista varten. (Bazylievych 2017.)

4.3 Klas Oil JSC

Klas Oil on yksi johtavista yrityksistä Bulgarian ruokateollisuudessa. Yritys on perustettu vuonna 2001. Klas Oilin päätoimintaa ovat öljykasvien siementen prosessointi, raakaöljyn ja jalostetun öljyn tuotanto sekä öljyntuotannon sivutuotteiden tuotanto. Lisäksi yrityksen toimintaan kuuluu Bulgarian sisäinen kauppa sekä ulkomaankauppa yrityksen valmistamilla tuotteilla. Klas Oil käsittelee vuosittain auringonkukan- ja rypsinsemiä sekä soijapapuja yhteensä 120 000 tonnia. (Klas Oil JSC.)

Sähköpostin välityksellä pidettyyn haastatteluun vastasi Klas Oilin kaupallinen johtaja Georgi Veselinov. Veselinovin mukaan Klas Oil ei tällä hetkellä myy auringonkukkapellettejä. Hän kertoo, että yritys käyttää kaikki tuottamansa auringonkukansiementen kuoret kattamaan laitoksen oma energiantarve. Kuorista tuotetaan höyryä polttamalla ne kattilassa, joka on suunniteltu auringonkukkapellettien polttamiselle. (Veselinov 2017.)

5 Yhteenveto

Opinnäytetyössä tutkittiin auringonkukkapellettien mahdollista käyttämistä kivihiilen korvaajana. Tähän tutkimukseen kuului auringonkukkapellettien ominaisuuksien selvittäminen, pellettien käytön hyötyjen ja hankaluuksien kartoittamista sekä pellettien käyttökokemusten tiedustelua. Lisäksi vertailtiin auringonkukkapellettien, eräiden muiden biopolttoaineiden sekä kivihiilen polttoainekäyttöön liittyviä ominaisuuksia ja muita tekijöitä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli saada auringonkukkapellettien käyttäjiltä tietoja ja kokemuksia pellettien käyttöön liittyen, ja edistää tiedoilla auringonkukkapellettien polttoainekäyttöä. Pellettien energiakäyttömahdollisuuden kasvattamista tavoiteltiin myös kirjallisuuslähteiden tutkimuksella sekä polttoaineiden ominaisuuksien vertailulla. Selvitys auringonkukkapellettien ominaisuuksista kattoi niiden materiaalin rakenteen, teknisen ja al-

kuineanalyysin, tuhkan koostumuksen sekä materiaalin lämpöarvojen tarkastelun. Vertailu kivihiilen kanssa sisälsi tarkastelun polttoaineiden käyttövolyymeistä, tuntemuksesta, ominaisuuksista ja hinnoista. Näitä ominaisuuksia vertaamalla selvitettiin mahdollisuuksia korvata kivihiili auringonkukkapelleteillä energiantuotannossa.

Työn teoreettiseen osaan selvitettiin auringonkukkapellettien tuotanto, ominaisuudet ja muut keskeisimmät aspektit niiden energiakäyttöön liittyen. Haastattelut tarjosivat toisenlaisen näkökulman kootun teorian rinnalle. Haastattelujen vastauksista ilmeni, että erityisesti auringonkukkaöljyntuotantolaitoksilla on kannattavaa käyttää sivutuotteina syntyviä auringonkukkapellettejä. Lisäksi haastattelut avasivat käsitystä siitä, miten kansainväliset konfliktitilanteet voivat vaikuttaa energiantuotantoon ja käytettyihin polttoaineisiin. Haastattelut tarjosivat myös yleisen tason näkemystä kohdemaiden energiasektorista.

Teoria ja haastattelut tarjosivat arvokasta tietoa tulevaisuuden vihreämmästä energiasta. Mitä enemmän aiheesta tiedetään, sitä monipuolisemmin ja tehokkaammin sitä pystytään hyödyntämään. Vaikka haastatteluissa saatiin kartoitettua auringonkukkapellettien käyttökokemuksia, on haastatteluja ja kyselyitä syytä jatkaa mahdollisimman luotettavan ja perustavanlaatuisen tutkimuksen takaamiseksi.

Selvityksen laajuus täytti opinnäytetyön selvitystyölle asetetut tavoitteet. Tavoite auringonkukkapellettien energiakäytön haasteiden selvittämisestä saavutettiin niin pellettien käyttäjien haastatteluilla, että kirjallisuuslähteiden avulla. Vaikka haastatteluista saatiin monipuolista tietoa erilaisista näkökulmista auringonkukkapellettien käyttöön liittyen, vain murto-osa tahoista, joihin oltiin yhteydessä, vastasi. Tämä olikin merkittävin haaste, joka tuli opinnäytetyötä tehtäessä eteen. Haasteesta huolimatta tavoite käyttökokemusten keräämisestä saavutettiin.

Kaiken kaikkiaan auringonkukkapelletit sopivat niin kotitalouksien kattiloihin kuin kaupallisiin kattiloihin kaukolämmön sekä yhdistetyn lämmön ja sähkön tuotantoon. Auringonkukkapellettejä voidaan käyttää joko ainoana polttoaineena tai polttaa esimerkiksi kivihiilen seassa, ja vähentää näin energiantuotannosta aiheutuvia ympäristölle haitallisia päästöjä. Auringonkukkapellettien mahdollinen käyttövolyymi huomattiin riittämättömäksi korvaamaan kivihiilen käyttö kokonaan, mutta todettiin olevan mahdollista vähentää ympäristöpäästöjä sekä maatalousjätettä hyötykäyttämällä auringonkukkaöljyntuotannon sivuvirta energiantuotannossa.

Lähteet

Agar, David. Torrefioitu biomassa – tuotantoprosessi ja mahdollisuudet. Verkkodokumentti. Jyväskylän yliopisto. < www.kesto.fi/GetItem.asp?item=file;5391>. Luettu 20.11.2017.

Alakangas, Eija, Erkkilä, Ari & Oravainen, Heikki. 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävää tulisijälämmitys. Verkkodokumentti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.pdf>>. Luettu 31.10.2017.

Alakangas, Eija, Hurskainen, Markus, Laatikainen-Luntama, Jaana, Korhonen, Jaana. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Verkkodokumentti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. < <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>>. Luettu 18.10.2017.

Bazylievych, Igor. 2017. Kaupallinen johtaja, Optimus Agro. Haastattelu 30.11.2017.

BP Statistical Review of World Energy. 2016. Verkkodokumentti. BP. <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-coal.pdf>>. Luettu 28.12.2017.

Biomass Compared to Fossil Fuels, Solar and Wind. 2017. Verkkodokumentti. Viaspace. <http://www.viaspace.com/biomass_versus_alternatives.php>. Luettu 28.12.2017.

Coal Prices. 2018. Verkkodokumentti. BP. <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/coal/coal-prices.html>>. Luettu 2.1.2018.

Demirbaş, Ayhan. 2002. Fuel Characteristics of Olive Husk and Walnut, Hazelnut, Sunflower and Almond Shells. Energy Sources.

Energia ja ilmastosanastoa. Verkkodokumentti. Voimatori-yhtiöt. <http://www.voimatori.fi/energiatietoa/fi_FI/Sanasto/>. Luettu 8.11.2017.

Gekalo, Serhii. 2017. Myynti-osaston työntekijä, Lux-Oil. Haastattelu 28.11.2017.

FAOSTAT. 2017. Verkkodokumentti. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <<http://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Luettu 9.10.2017.

Heuzé, V., Tran, G., Hassoun, P., Lessire, M. & Lebas F., 2015. Sunflower hulls and sunflower screenings. Verkkodokumentti. Feedipedia, a programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. < <https://www.feedipedia.org/node/733>>. Luettu 16.10.2017.

Klas Oil JSC. Klas Oilin www-sivut. <<https://klasolio.com/en/>>. Luettu 5.12.2017.

Kuittinen, Tuomo. 2012. Biopolttoaineiden ominaisuudet. Kandidaatintyö. Lappeenranta Teknillinen Yliopisto.

Kuokkanen, Matti, Kolppanen, Reetta & Kuokkanen, Toivo. 2011. Nesteiden ja kiinteiden polttoaineiden lämpöarvojen määrittäminen. Verkkodokumentti. Oulun Ammattikorkeakoulu. <http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/ekopelletti_info_220611.pdf>. Luettu 10.11.2017.

Lux-Oil. Lux-Oilin www-sivusto. <<http://lux-oil.com.ua/eng/index.html>>. Luettu 5.12.2017

Milloin tuhka kelpaa lannoitteeksi? 2011. Verkkodokumentti. Seinäjoen sanomat. <<http://www.seinajoensanomat.fi/artikkeli/45020-milloin-tuhka-kelpaa-lannoitteeksi>>. Luettu 10.12.2017.

Optimus Agro. 2016. Optimus Agron www-sivusto. <<http://optimus.com.ua/en/>> Luettu 5.12.2017.

Pelletin tuotanto. Verkkodokumentti. Bioenergia ry. <<http://www.pellettienergia.fi/pelletin%20tuotanto>>. Luettu 22.11.2017.

Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S. & Mekhilef S. 2011. A review on biomass as a fuel for boilers. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15.

Sanasti. 2017. Verkkodokumentti. Öljy- ja biopolttoaineala ry. <<http://www.oil.fi/fi/ajankohtaista/sanasto/e>>. Luettu 28.2.2017.

Solution for Making Wood Pellets from Sunflower Husk. 2012. Verkkodokumentti. Amisy Machinery. <<http://www.wood-pellet-mill.com/Solution/sunflower-pellets.html>>. Luettu 13.10.2017.

Sunflower Husk Pellets. 2017. Verkkodokumentti. Flex Technologies. <<https://www.flextechnologies.co.uk/en/sunflower-husk-pellets>>. Luettu 10.10.2017.

Sunflower Husk Pellets. Verkkodokumentti. Biokaitra. <<http://biokaitra.lt/en/pellet-fuel/sunflower-husk-pellets/>>. Luettu 22.11.2017.

Sunflower Husk Pellets. Verkkodokumentti. Global-Agro Group LLC. <<http://global-agro.net/24-sunflower-husk-pellets.html>>. Luettu 2.1.2018.

Sunflower Husk Pellets. Verkkodokumentti. Renergy UK Ltd. <<http://www.renergyuk.com/sunflower-husk-pellets/>>. Luettu 10.10.2017.

Tuhkan käyttö lannoitteena. 2016. Verkkodokumentti. Elintarviketurvallisuusvirasto. <<https://www.evira.fi/kasvit/viljely-ja-tuotanto/lannoitevalmisteet/kierratysravinteet/tuhkan-kaytto-lannoitteena/>>. Luettu 10.12.2017.

Ukrainian Biofuel Portal. 2018. Ukrainian Biofuel Portal www-sivusto. <<http://pellets-wood.com/>>. Luettu 2.1.2018.

Vares, Michael. 2017. RenergyUK Ltd. Haastattelu 4.12.2017.

Vanninen, Markus. 2009. Tyypillisten biomassamateriaalien kemiallinen koostumus. Pro gradu –tutkielma. Jyväskylän Yliopisto.

Veselinos, Georgi. 2017. Kaupallinen johtaja, Klas Oil JSC. Haastattelu 30.11.2017.

Wikberg, Hanne & Maunu, Sirkka Liisa. 2003. Selluloosan monimuotoisuus. Verkko-dokumentti. Helsingin Yliopisto. <<http://www.helsinki.fi/kemma/data/kemiaa-kumpulassa/selluloosa.pdf>>. Luettu 20.12.2017.

Wilén, Carl, Jukola, Perttu, Järvinen, Timo, Sipilä, Kai, Verhoeff, Fred & Kiel, Jaap. 2013. Wood torrefaction – pilot tests and utilisation prospects. Verkkodokumentti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T122.pdf>>. Luettu 20.11.2017