Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Biopolttoaineiden ominaisuudet

Biofuel properties

Työn tarkastaja: Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: Esa Vakkilainen, Kari Luostarinen

Lappeenranta 18.4.2018

Vilma Lamminen

TIIVISTELMÄ

Vilma Lamminen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Kari Luostarinen, Esa Vakkilainen

Kandidaatintyö 2019

31 sivua, 4 kuvaa ja 10 taulukkoa

Hakusanat: kandidaatintyö, biopolttoaineiden ominaisuudet, puupolttoaineet, peltobiomassat

Työn tavoitteena oli tutkia suomalaisia biopolttoaineita ja niiden ominaisuuksia erityisesti polton kannalta. Työssä käsitellään biopolttoaineiden roolia Suomessa sekä tärkeimpiä suomalaisia biopolttoaineita sekä niiden ominaisuuksia. Tämän lisäksi työssä vertaillaan näitä ominaisuuksia valituilla biopolttoaineilla.

Tarkastelun kohteena polttoaineiden osalta oli suomalaiset kiinteät puupolttoaineet sekä peltobiomassat. Tarkasteltaviin puupolttoaineisiin valittiin metsähake, metsätähdehake, kuori, kannot, metsäteollisuuden sivutuotteet sekä pelletit ja briketit. Tarkasteltaviksi peltobiomassoiksi taas valittiin ruokohelpi ja olki.

Tarkasteltaviksi ominaisuuksiksi valittiin lämpöarvo, kosteus, alkuainekoostumus, haitalliset aineet, haihtuvat aineet sekä tuhkan ominaisuudet.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Tiivistelmä **2**

Sisällysluettelo **3**

Symboli- ja lyhenneluettelo **5**

1 Johdanto **7**

2 Biopolttoaineet Suomessa **9**

2.1 Puupolttoaineet ... 10

2.1.1 Metsähake ... 11

2.1.2 Metsätähdehake ... 11

2.1.3 Kuori ja kannot ... 12

2.1.4 Metsäteollisuuden sivutuotteet ... 12

2.1.5 Pelletit ja briketit ... 13

2.2 Peltobiomassat ... 14

2.2.1 Ruokohelpi ... 15

2.2.2 Olki ... 15

3 Biomassalaitosten polttotekniikat **16**

3.1 Arinapoltto ... 16

3.2 Leijukerrospoltto ... 17

3.2.1 Leijupetikattilat ... 17

3.2.2 Kiertopetikattilat ... 18

4 Biopolttoaineiden ominaisuudet **19**

4.1 Lämpöarvo ... 19

4.2 Kosteus ... 20

4.3 Alkuainekoostumus ... 21

4.4 Haitalliset aineet ... 21

4.5 Haihtuvat aineet ... 22

4.6 Tuhka ... 22

4.6.1 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen ... 23

5 Ominaisuuksien vertailu **24**

5.1 Puupolttoaineet ... 24

5.2 Peltobiomassat ... 25

5.3 Haitalliset aineet 27
5.4 Tuhkan ominaisuudet 28

6 Yhteenveto **30**

Lähdeluettelo **32**

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

Kreikkalaiset aakkoset

$[H]$	vetypitoisuus painoprosenttina.	
M_T	polttoaineen kosteuspitoisuus	
$Q_{net,v,m}$	alempi lämpöarvo vakiotilavuudessa	[J/g]
$Q_{gr,v}$	ylempi lämpöarvo vakiotilavuudessa	[J/g]

Kemialliset merkit

Al_2O_3	Alumiinitrioksidi
CaO	Kalsiumoksidi
C	Hiili
Cl	Kloori
Fe_2O_3	Rauta(III)oksidi
H	Vety
HCl	Vetykloridi/suolahappo
K	Kalium
K_2O	Kaliumoksidi
MgO	Magnesiumoksidi

N	Typpi
Na	Natrium
Na_2O	Natriumoksidi
NO_x	Yleisnimi typen oksideille
O	Happi
P_2O_5	Fosforipentoksidi
S	Rikki
SiO_2	Piioksidi
SO_2	Rikkidioksidi
SO_3	Rikkitrioksidi

Lyhenteet

FT	juoksevuuslämpötila
HT	puolipallolämpötila
IT	muodostumislämpötila
ST	pehmenemislämpötila

1 JOHDANTO

Läpi historian biomassa kaikissa muodoissaan on ollut tärkein ruuan, rehun, polttoaineen, raaka-aineen, kuidun ja lannoitteen lähde. Nykyään biomassa nähdään usein siirtymävaiheessa olevana polttoaineena, vaikka todellisuudessa se on ja tulee jatkossakin olemaan tärkein energianlähde monille ihmisille. (Rosillo-Calle et al. 2007, s.1-3)

Biopolttoaine on biomassasta valmistettu polttoaine. Tästä saatavaa energiaa kutsutaan bioenergiaksi. Biomassoja voidaan tuottaa päätuotantona biopolttoaineiksi mutta biomassoja saadaan myös sivutuotteena esimerkiksi puunjalostusteollisuudesta tai maa- ja metsäteollisuudesta. Myös yhdyskuntajätteen biohajoava osa voidaan hyödyntää energiaksi. (Hakala et al. 2009, s.4)

Bioenergia on Suomen merkittävin uusiutuvan energian lähde. Biomassoja saadaan useista eri lähteistä kuten metsistä, pelloilta, teollisuuden sivuvirroista ja jätteistä. Biomassoista voidaan jalostaa kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Selkeästi suurin bioenergian tuottaja ja käyttäjä Suomessa on metsäteollisuus. (Motiva 2018)

Suomessa käytettäviä biopolttoaineita ovat puuperäiset polttoaineet, peltobiomassa, turve, biopolttonesteet, biokaasut sekä kierrätys- ja jätepolttoaineiden biohajoava osuus. Turvetta ei kuitenkaan määritellä biomassaksi, vaan se yleensä mielletään fossiiliseksi polttoaineeksi.

Biopolttonesteisiin kuuluvat bioöljyt. Biodiesel on yleisnimitys kasviöljypohjaiselle dieselpolttoaineelle, jota käytetään dieselmoottoreissa. Pyrolyysillä valmistettu puuöljy on lupaavalta näyttävä biopolttoneste, jota voidaan käyttää lämmitysöljynä. (Alakangas 2000, s. 138-139)

Biokaasu on kaasuseos, joka sisältää yleensä noin 40-70 prosenttia metaania, 30-60 prosenttia hiilidioksidia ja pieniä pitoisuuksia esimerkiksi rikkiyhdisteitä. Suomessa biokaasua käytetään lähinnä lämmön ja sähkön tuotantoon mutta siitä voidaan jalostaa myös liikennepolttoainetta. (Biokaasuyhdistys 2019) Vuonna 2015 biokaasulaitosten kaasulla tuotettiin noin 350 GWh verran lämpöä ja sähköä, jonka voi ajatella vastaamaan 18 000 omakotitalon lämpöenergiaa. (Gasum)

Tässä työssä tarkastellaan erityisesti kiinteitä puuperäisiä polttoaineita sekä peltobiomassoja.

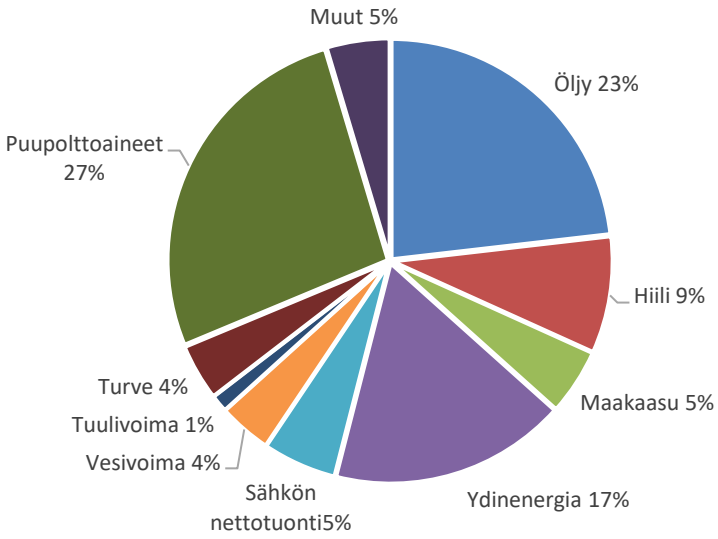
Työssä tarkastellaan myös biopolttoaineiden polttotekniikoita, sillä tarkasteltavat ominaisuudet on valittu polton kannalta ajateltuna. Biopolttoaineita Suomessa voidaan ominaisuuksien mukaan polttaa joko arina- tai leijukerrospoltossa. Leijukerroskattilat voidaan jakaa kerrosleijukattiloihin ja kiertoleiju- eli kiertopetikattiloihin.

Polttoaineiden ominaisuudet ovat erityisen tärkeitä polttoteknisistä syistä sekä polttoaineen laadun arvioinnissa. Työssä tarkasteltavia polttoaineiden ominaisuuksia ovat lämpöarvo, kosteus, tiheys, alkuainekoostumus, haitalliset aineet, haihtuvat aineet sekä tuhkan ominaisuudet. Kunkin ominaisuuden kohdalla käydään läpi niiden merkitys, ilmoitustapa sekä vaikutukset polttoaineen käytössä. Näiden lisäksi käydään läpi myös ominaisuuksien määritystapoja.

Lopuksi työssä vertaillaan eri puupolttoaineiden sekä peltobiomassojen ominaisuuksia. Vertailtavat ominaisuudet ovat kosteus, lämpöarvo, tiheys, energiatiheys, haihtuvien aineiden osuus, tuhkan määrä sekä polttoaineen alkuainekoostumus.

2 BIOPOLTTOAINEET SUOMESSA

Energian kokonaiskulutus Suomessa vuonna 2017 oli 1,36 miljoonaa terajoulea. Uusiutuvien energianlähteiden kulutus kasvoi tällöin 6 prosenttia nostaen niiden osuuden energian kokonaiskulutuksesta 36 prosenttiin. Puupolttoaineiden kulutus kasvoi 3,5 prosenttia, jolloin puupolttoaineiden osuus energian kokonaiskulutuksesta oli 27 prosenttia. Puupolttoaineet pysyivät siis Suomen merkittävimpänä yksittäisenä energianlähteenä myös vuonna 2017. (Tilastokeskus)



Kuva 1. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin vuonna 2017.

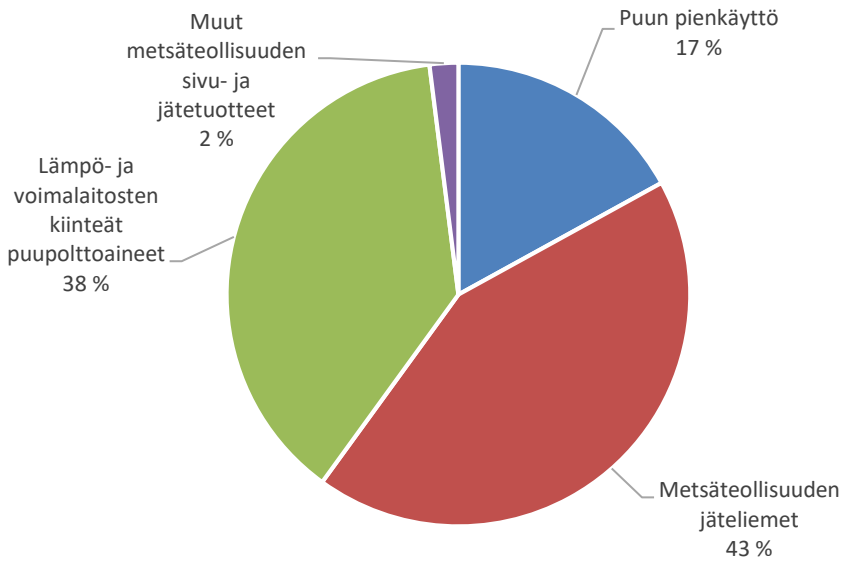
Tärkeimpiä Suomessa käytettäviä biopolttoaineita ovat puuperäiset polttoaineet ja peltobiomassat. Puuperäisiä polttoaineita ovat muun muassa teollisuuden jäteliemet ja puutähteet. Peltobiomassoja taas ovat muun muassa ruokohelpi, öljykasvit sekä oljet. (Tilastokeskus)

Uusiutuvien energianlähteiden käyttö on kasvanut huomattavasti viimeisien vuosikymmenien aikana. Tätä selittää esimerkiksi vuonna 2005 EU:n alueella alkanut päästökauppa. Päästökaupan myötä uusiutuvien energianlähteiden kilpailukyky parani ja esimerkiksi metsähakkeen käyttö lähes viisinkertaistui vuodesta 1999 vuoteen 2008 mennessä. Metsähakkeen sekä peltobiomassojen mahdollisuudet on alettu tiedostaa. (Villa et al. 2010, s. 28-29)

Bioenergian käyttö tulee lisääntymään jatkossakin. Kansallisen energia- ja ilmastostrategian mukaan uusiutuvan energian osuus on nostettava yli 50 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä, jonka lisäksi omavaraisuuden osuus on nostettava yli 55 prosenttiin. Näihin tavoitteisiin pääsemisessä bioenergian sekä muun uusiutuvan energian tarjonnan lisääminen on suuressa roolissa. (Huttunen 2017, s. 25-26)

2.1 Puupolttoaineet

Puupolttoaineita kulutettiin suomessa vuonna 2017 enemmän kuin koskaan aikaisemmin. Ne olivat Suomen merkittävin energianlähde ja kattoivat kokonaiskulutuksesta 27 prosenttia. Tämä 27 prosentin osuus koostui metsäteollisuuden jäteliemistä, lämpö- ja voimalaitosten kiinteistä puupolttoaineista sekä puun pienkäytöstä kuvan 2 mukaisesti. Suomessa merkittävimpiä kiinteitä puupolttoaineita tällä hetkellä ovat metsähake ja kuori. (Luonnonvarakeskus 2018)



Kuva 2. Puupolttoaineiden kulutus. (Luonnonvarakeskus 2018)

Puupolttoaineet jaetaan nestemäisiin, kiinteisiin ja muihin puupolttoaineisiin. Nestemäiset puupolttoaineet ovat lähinnä selluteollisuuden jäteliemiä. Kiinteitä puupolttoaineita ovat lämpö- ja voimalaitosten käyttämät puupolttoaineet kuten hakkeet, puru, kuori, puupelletit ja -briketit sekä kierrätyspuu. Näiden lisäksi energiantuotantoon

käytetään vähäisiä määriä muita metsäteollisuuden sivu- ja jätetuotteita. (Pohjois-Savon ELY-keskus 2016)

Puupolttoaineiden ominaisuudet voivat riippua useista tekijöistä, kuten puun kasvupaikasta, puulajista, puun osasta, puun iästä tai vuodenajasta.

2.1.1 Metsähake

Suurin osa metsähakkeesta päätyy poltettavaksi lämpö- ja voimalaitoksissa, mutta pieni osa päätyy myös käytettäväksi esimerkiksi maatiloilla tilojen lämmitykseen tai biopolttoaineiden kuten bioöljyn tuotantoon. Tavoitteena on kasvattaa metsähakkeen käyttöä lämpö- ja voimalaitoksissa 13,5 hm^3 vuoteen 2020 mennessä. Vastaava taso vuonna 2015 oli 7,35 hm^3. (Ranta et al. 2017)

Hake on hakkurilla koneellisesti haketettua puuta. Yleensä hake nimetään sen valmistusaineen tai hakkeen käyttötarkoituksen mukaan. Metsähake on yleisnimitys, jota voidaan käyttää kokopuusta, rangoista tai metsätähteestä valmistetulle hakkeelle. Kokopuuhaketta valmistetaan karsimattomasta puusta, rankahaketta karsitusta rungosta ja hakkuutähdehaketta hakkuutähteestä. Polttokäyttöön tarkoitettu hake on polttohaketta ja selluteollisuuden raaka-ainetta kutsutaan selluhakkeeksi. (Putula, Hilli 2017; Alakangas 2000, s.48)

2.1.2 Metsätähdehake

Metsätähdehake (forest residue chips) on valmistettu ainespuun korjuussa uudistushakkuissa tai nuorta metsää harventaessa tähteeksi jääneistä osista, kuten oksista, latvuksista ja hukkarunkopuusta. Hakkuutähteeksi voidaan luokitella ainespuun hakkuun ja metsäkuljetuksen jälkeen tähteeksi jäävä raaka-aine. Näihin ei kuulu kannot tai juuret. (Knuuttila 2003, s. 3, 38)

Hakkuutähteen ominaisuuksiin ja kertymään voivat vaikuttaa esimerkiksi hakattavan puuston koko, kasvatustiheys, käsittelyhistoria ja ainespuun mitta- ja laatuvaatimukset. Hakkuutähteen kertymä riippuu luonnollisesti myös hakkuiden määrästä ja hakkuualasta. Paras hakkuutähteen kertymä syntyy uudistushakkuualoilla, sillä puusto näillä alueilla ei vaikeuta korjuuta ja hakkuutähteiden sisältämät ravinteet eivät ole jäävän puuston

kasvuun hyödynnettävissä. Uudistushakkuualoista taas parhaiten hakkuutähdettä kertyy kuusivaltaisilta alueilta, sillä kuusesta kertyvän hakkuutähteen määrä verrattuna mäntyyn tai koivuun on yli kaksinkertainen. (Knuuttila 2003, s. 38-40)

2.1.3 **Kuori ja kannot**

Kuori muodostaa 10-15 prosenttia puurungon kokonaispainosta. Puun jatkojalostusta ajatellen kuoren rooli on kuitenkin vähäinen ja esimerkiksi mekaanisessa puunjalostuksessa puu kuoritaan ja vain kuoritun rungon puuaineella on merkitystä. (Jääskeläinen et al. 2007, s.107)

Puun kuoren rakenne voi vaihdella paljon riippuen puulajista, puun iästä ja kasvupaikasta. Tämän lisäksi kuoren rakenne ja kemiallinen koostumus voi vaihdella myös riippuen siitä, missä kohtaa runkoa tilannetta tarkastellaan. (Jääskeläinen et al. 2007, s.107)

Kuoren lämpöarvo on korkea sen sisältämän ligniinin ansiosta. Lämpöarvo ei juurikaan vaihtele rungon eri korkeuksista, mutta puulajien välillä lämpöarvon vaihtelevuus voi olla suurta. Lehtipuilla on yleisesti ottaen selvästi korkeammat lämpöarvot kuin havupuilla. Kuoren ominaisuuksien heikentäviä tekijöitä ovat korkeat kosteus- ja tuhkapitoisuudet. Näiden takia kuoren polttamisessa on usein ennemminkin kysymys kuorijätteen hävittämisestä kuin energiantuotannosta. Kuoren ominaisuuksia on kuitenkin mahdollista parantaa esimerkiksi puristamalla, kuivaamalla tai sekoittamalla sitä muiden polttoaineiden joukkoon. (Alakangas 2000, s. 66)

Kantoja taas joutuu yleensä turpeen joukkoon, jonka lisäksi niitä voidaan joutua poistamaan esimerkiksi rakennustyömailta. Kannot yleensä murskataan, mutta ne on mahdollista myös hakettaa. Kantohakkeen kosteus on noin 35 prosentin luokkaa ja sen tuhkapitoisuudet riippuvat siitä, onko mukaan joutunut maa-ainesta. Yleensä tuhkapitoisuudet vaihtelevat 3,8-13 prosentin välillä. (Alakangas 2000, s. 67)

2.1.4 **Metsäteollisuuden sivutuotteet**

Metsäteollisuudessa puutähteitä ja sivutuotteita syntyy puumassateollisuudesta, sahauksesta ja jatkojalostuksesta sekä vaneriteollisuudesta. Puumassateollisuudessa kemiallinen massanvalmistus tarvitsee paljon energiaa, mutta tuottaa sen ja ylikin

mustalipeästä ja kuoresta. Sulfaattisellutehtaalla suurin osa puuperäisestä energiasta saadaan mustalipeästä ja vajaa 15 prosenttia saadaan kuoresta. Mekaanisessa massanvalmistuksessa eli hiokkeen, painehiokkeen, hierteen ja kuumahierteen valmistuksessa ei ole edellytyksiä samanlaiseen energiantuotantoon kuin kemiallisessa, sillä puumassan saanto on jopa 90 prosenttia. (Knuuttila 2003, s. 41-44)

Sahateollisuuden sivutuotteena syntyvää kuorellista tai kuoretonta haketta kutsutaan sahanhakkeeksi. Puunjalostusteollisuuden sivutuotteena syntyvästä kuoresta suurin osa on havupuiden kuorta.

Polttoaineena voidaan käyttää myös puutavaran sahauksen sivutuotteena syntyvää sahanpurua tai konehöyläyksestä syntyvää kutterinlastua. Sahanpuru on usein märkää, mutta sen kosteus voi vaihdella huomattavasti aina ilmakuivasta jopa 70 prosenttiin. Kutterinlastu taas on yleensä niin kuivaa ja kevyttä, ettei sitä voida polttaa sellaisenaan. Tämän sijaan se sekoitetaan usein raskaampiin ja kosteampiin polttoaineisiin. Sahanpurua ja kutterinlastua voidaan polttaa muiden polttoaineiden ohella metsäteollisuuslaitosten ja lämpökeskusten kattiloissa. Sahanpurusta ja kutterinlastusta voidaan valmistaa myös pellettejä ja brikettejä. (Alakangas 2016, s. 85)

2.1.5 **Pelletit ja briketit**

Pellettejä ja brikettejä voidaan käytännössä valmistaa mistä tahansa kiinteästä biopolttoaineesta, mutta useimmiten raaka-aine on metsäteollisuuden sivutuotteita, kuten kuivaa purua, hiontapölyä ja kutterinlastua. Jos raaka-aine kuivataan ennen puristusta, pellettejä ja brikettejä voidaan valmistaa myös tuoreesta biomassasta, kuoresta tai metsähakkeesta. (Alakangas 2016, s. 95)

Pelletit ovat lyhyitä lieriömäisiä tai pallomaisia yksiköitä, joiden halkaisija on 6-12 millimetriä ja pituus on 10-30 millimetriä. Pelletin raaka-aineen valinta on tärkeää, sillä erilaisilla materiaaleilla on erilaiset lämpöarvot, tuhkapitoisuudet ja aineominaisuudet. Tämän vuoksi eri raaka-aineita on valmisteltava hieman eritavoilla pelletointiin, jotta saadaan valmistettua hyvälaatuisia pellettejä. Valmistelu voi tarkoittaa esimerkiksi kuivausta. Pellettien raaka-aineiden tiheys ennen pelletointia on melko alhainen, noin 40-250 kg/m^3. Pelletoinnin jälkeen tiheys on noin 600-800 kg/m^3. Näin merkittävä tiheyden

nousu johtaa pienentyviin varastointi- ja kuljetuskustannuksiin. (Ali Abdoli et al. 2018, s. 47)

Pellettejä pidetään puhtaana ja halpana polttoaineena, jolla voidaan auttaa vähentämään ilmaston lämpenemistä. Puupolttoaineiden kesken puupelletillä on eniten potentiaalia tulla käytetyksi pääraaka-aineena lämmön ja sähkön tuottamiseen, joten se on hyvä vaihtoehto korvaamaan fossiilisia polttoaineita. (Ali Abdoli et al. 2018, s.48)

Puubriketti taas on poikkileikkaukseltaan usein pyöreä tai neliön muotoinen. Pyöreässä briketissä voi olla sisällä reikä, jonka halkaisija on 10-20 millimetriä. Sivun pituus tai halkaisija on yleensä 50-80 millimetriä, eli briketit ovat usein hieman suurempia kuin pelletit. Suomessa sylinterimäisiä brikettejä valmistetaan Rantasalmella, Suolahdessa ja Kiteellä, mutta lisäksi joillakin mekaanisen metsäteollisuuden yrityksillä on pieniä brikettipuristimia, joilla tehdään kiekkomaisia brikettejä. (Alakangas 2000, s. 74)

Taulukko 1. Suomessa valmistettujen pellettien ja brikettien ominaisuuksia. (Alakangas 2000, s. 74,76)

	Tiheys	Tuhkapitoisuus	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	Kosteus
Pelletti	640-690 kg/i-m^3	0,3-0,5%	4,6-4,9 kWh/kg	14-17,5 MJ/kg	8-10 %
Briketti	1080 kg/m^3	0,50 %	4,8 kWh/kg	17,3 MJ/kg	6 %

2.2 Peltobiomassat

Peltokasvit voivat olla monipuolisia energian lähteitä. Kasviöljyperäisiä polttoaineita saadaan esimerkiksi auringonkukan, rapsin, rypsin, hampun tai soijan siemenistä. Rypsi, rapsi ja pellava voivat sopia käytettäväksi myös kiinteinä polttoaineina. Muun muassa viljan olki ja jyvät sopivat poltettavaksi kiinteässä muodossa. Alkoholiperäistä polttoainetta voidaan tuottaa sokeria tuottavista kasveista tai tärkkelyspitoisista viljoista. (Alakangas 2000, s. 97-102).

2.2.1 **Ruokohelpi**

Ruokohelpi on monivuotinen heinäkasvi, jolla on korkea biomassasato. Tämän lisäksi ruokohelpeä voidaan käyttää raaka-aineena paperin valmistuksessa, valumavesien suodatukseen ja haihdutukseen sekä rehuna eläimille. (Alakangas s. 103)

Suomessa ruokohelpi on yksi kilpailukykyisimmistä peltoenergian muodoista sen energia- ja kasvihuonekaasutaseiden sekä viljelyvarmuuden ansiosta. Ruokohelven ongelmakohdiksi muodostuvat kuljetuskustannukset koko tuotantoketjun aikana sekä sadon korjuutappiot, jotka voivat olla jopa 40-50 prosenttia. Korjuutappiot on tosin mahdollista saada 20 prosentin luokkaan uudemmalla niittotekniikalla sekä korjuukoneiden säädöillä. Kuljetuskustannuksien alentamisen kannalta tärkeää on helpipaalien tiiviys ja tasamuotoisuus. (Pahkala 2015, s. 33-35)

2.2.2 **Olki**

70-90 prosenttia peltokasvien sivutuotteiden potentiaalista koostuu Euroopassa viljakasvien oljista. Peltokasvien sivutuotteet sopivat hyvin polttoaineeksi energiantuotantoon sillä peltokasvien sivutuotteet eivät sovellu ihmisen ravinnoksi ja jopa niiden rehukäyttö on rajallista. Oljen teoreettinen energiapotentiaali on noin 10 TWh vuodessa riippuen viljan viljelyalan suuruudesta. (Pahkala 2015, s. 3)

Oljen käyttöä Suomessa rajoittaa esimerkiksi sääolot. Syksyn sateiden takia olkia ei välttämättä saada kuivumaan säilymisen kannalta riittävästi. Sateiden seurauksena on mahdollista myös, ettei maaperä ole tarpeeksi kantavaa korjuukoneille. Rajoitukseksi muodostuu myös kuljetusmatkat, sillä pienestä energiatiheydestä johtuen esimerkiksi paalattua olkea on riippuen oljen hinnasta ja kuljetuskustannuksista kannattavaa kuljettaa vain 100-200 kilometriä. (Pahkala 2015, s. 21)

3 BIOMASSALAITOSTEN POLTTOTEKNIIKAT

Polttolaitteiden tehtävä on saada polttoaine palamaan, jonka lisäksi palamisilman ja polttoaineen on reagoitava keskenään mahdollisimman tehokkaasti. Tätä varten on kehitetty useita erilaisia ja eri tyyppisiä polttotekniikoita erilaisia polttoaineita varten. Yleisiä ratkaisuja biopolttoaineita polttoaineena käyttävissä voimalaitoksissa ovat arina- sekä leijukerrospoltto, joita käsitellään tässä kappaleessa. (Huhtinen et al. 2008, s. 35)

Arinapoltto on vanhin kiinteille polttoaineille tarkoitettu polttotapa ja aikojen kuluessa on kehitetty hyvin monenlaisia arinaratkaisuja, jotka sopivat erityyppisille polttoaineille. Hyvin toimivia arinaratkaisuja löytyy useimmille kiinteille polttoaineille, kuten turpeelle, puulle ja puujätteelle. (Huhtinen et al. 2000, s. 146) Leijukerrospolttoa taas on alettu käyttämään energiantuotannossa vasta 1970- luvulla, mutta se on syrjäyttänyt arinatekniikan lähes kokonaan yli 20 MW:n tehoilla. Tämän lisäksi leijukerrospoltto voi olla varteenotettava vaihtoehto arinapoltolle pienemmilläkin tehoilla. (Huhtinen et al. 2008, s.36)

3.1 Arinapoltto

Arina on kattilan pohjalle sijoitettava polttolaite, jonka päällä kiinteä polttoaine poltetaan joko paikallaan pysyvänä tai hitaasti liikkuvana kerroksena. Arinat voidaan jakaa kiinteisiin arinoihin ja mekaanisiin eli liikkuviin arinoihin. Kiinteitä arinoita ovat taso-, viisto- ja porrasarinat, jotka kaikki sopivat pienitehoisiin kattiloihin. Mekaanista arinaa käytetään isommissa kattiloissa, joissa käytetään myös automaattista polttoaineen syöttöä sekä tuhkanpoistoa. (Huhtinen et al. 2000, s.146-147)

Ennen kuin polttoaine voi syttyä palamaan, se on lämmitettävä sytytyslämpötilaan. Lämmittämisen aikana polttoaine myös kuivuu. Näin ollen kosteat polttoaineet vievät energiaa moninkertaisesti pelkän lämmityksen energiatarpeeseen verrattuna, sillä kosteista polttoaineista on myös haihdutettava kosteus. Lämmityksen jälkeen polttoaine alkaa kaasuuntua. Kaasuuntuvia komponentteja on kotimaisissa polttoaineissa 55-85 prosenttia. Polttoainekerroksessa ensimmäisinä kaasuuntuvat komponentit syttyvät palamaan ja niiden luovuttama lämpö sytyttää myös kiinteät polttoainepartikkelit. (Huhtinen et al. 2000, s.152-153)

Arinapoltosta löytyy myös joitakin ongelmia. Arinapoltossa palamista on vaikea hallita, jonka lisäksi polttoaine voi jakautua ja palaa epätasaisesti, jolloin epätasaisesta palamisesta voi aiheutua esimerkiksi päästöjä. Myös kattilan kuonaantuminen aiheuttaa ongelmia. Edellä mainitut ongelmat ovat erityisen tavallisia kiinteissä arinoissa. (Huhtinen et al. 2008, s. 36)

3.2 Leijukerrospoltto

Leijukerrospoltossa polttoaine poltetaan leijutettavan hiekan seassa ja leijutus tapahtuu alta puhallettavan ilman avulla. Leijukerroskattilat voidaan jakaa kerrosleijukattiloihin ja kiertoleiju- eli kiertopetikattiloihin. Leijukerroskattilat eroavat toisistaan käytettävissä leijutusnopeuksissa, sillä kiertopetikattilassa käytetään hienompaa hiekkaa ja suurempaa leijutusnopeutta. (Huhtinen et al. 2008, s.36)

Kerrosleijukattilat soveltuvat erityisesti kosteille polttoaineille, sillä kattilaan syötetty polttoaine hautautuu kuumaan hiekkaan ja kuivuu hiekan seassa, syttyen lopulta palamaan. (Huhtinen et al. 2008, s. 36)

3.2.1 Leijupetikattilat

Leijupetikattilan hiekan keskiraekoko on 1-3 mm, leijutusnopeus on 0,7-2 m/s ja hiekkakerroksen korkeus noin 0,4-0,8 m. Polttoaine syötetään mekaanisesti petin päälle. Tämä tarkoittaa sitä, että polttoainesiilon alapuolinen kuljetin syöttää polttoaineen sulkusyöttimen kautta pudotusputkeen, josta polttoaine putoaa petin päälle. Syöttöputkia on tavallisesti useampia, jotta polttoaine saadaan putoamaan tasaisesti. (Huhtinen et al. 2000, s. 157)

Leijupetikattilassa pystytään samassa tulipesässä polttamaan useita polttoaineita, mutta usein pääpolttoine on jokin kiinteä ja kostea aine. Leijupetikattilassa voidaan polttaa teollisuusjätteitä sekä kosteita kotimaisia polttoaineita, jotka sisältävät runsaasti haihtuvia aineita, syttyvät alhaisissa lämpötiloissa ja joiden jäännöskoksin palamisaika on lyhyt. Näiden kriteerien vuoksi esimerkiksi hiilen polttaminen leijupetikattilassa on ongelmallista. (Huhtinen et al. 2000 s. 158-159)

3.2.2 **Kiertopetikattilat**

Kiertopetikattiloiden tyypillinen leijutusnopeus on 3-10 m/s ja hiekan raekoko on 0,1-0,5 mm. Tyypillistä hiekkakerroksen korkeutta ei voida mitata, sillä kiertopetistä ei erotu selvää pintaa. Kiertopetikattiloissa käytetään suurempia nopeuksia ja hienojakoisempaa hiekkaa, jonka seurauksena kiertopetikattila toimii leijutusalueella, jolle on ominaista voimakas pyörteisyys ja hiukkasten hyvä sekoittuminen. Petin tiheys pienenee korkeuden funktiona. (Huhtinen et al. 2000, s. 159)

Myös kiertopetikattila soveltuu kosteiden polttoaineiden polttamiseen, mutta tämän lisäksi myös hiilen polttoon. Suomessa kiertopetikattiloita käytetään kaukolämpölaitoksissa, jossa on haluttu varautua myös hiilen polttoon. Maailmalla sen sijaan leijupetikattiloita käytetään lähinnä suurten, hiiltä käyttävien lauhdevoimalaitosten kattiloina. (Huhtinen et al. 2008, s.36)

4 BIOPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET

Tärkeimpiä polttoaineiden määritettäviä ominaisuuksia ovat teknillinen analyysi, alkuainekoostumus, lämpöarvo sekä tuhkan sulamiskäyttäytyminen. Teknillinen analyysi sisältää kosteuden, haihtuvien aineiden, tuhkan ja kiinteän hiilen osuudet polttoaineesta ja sitä voidaan käyttää polttoaineen laadun arvioinnissa. Usein tarvitaan tietoa myös tiheydestä, palakoosta tai muista käsittelyteknisistä ominaisuuksista. Erityisesti polttoteknisistä syistä tärkeitä ominaisuuksia ovat myös raskasmetallipitoisuudet ja erilaisten metallien tai epämetallien pitoisuudet polttoaineessa ja tuhkassa. (Alakangas 2000, s. 26) Tässä työssä tarkastellaan erityisesti lämpöarvoa, kosteutta, alkuainekoostumusta, haitallisia aineita, haihtuvia aineita ja tuhkan ominaisuuksia.

4.1 Lämpöarvo

Lämpöarvo on merkitykseltään tärkein polttoaineominaisuus. Lämpöarvo on täydellisessä palamisessa kehittyvä lämpömäärä, joka kiinteille polttoaineille ilmoitetaan yleensä energiana massayksikköä kohti. Tällöin lämpöarvon yksikkö on MJ/kg. Mikäli lämpöarvo on ilmoitettu tilavuutta kohti, puhutaan energiatiheydestä ja tällöin yksikkönä käytetään MJ/m^3 tai MWh/m^3. (Raiko et al. 2002 s. 122-123, Alakangas s. 1-12)

Lämpöarvo voidaan ilmoittaa joko kalorimetrisenä eli ylempänä lämpöarvona tai tehollisena eli alempana lämpöarvona. Kalorimetrinen lämpöarvo on lämpömäärä, joka vapautuu, kun massayksikkö polttoainetta palaa täydellisesti ja palaessa syntynyt vesi sekä polttoaineen sisältämä vesi ovat palamisen jälkeen nesteenä peruslämpötilassa. Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan yleensä tehollisena lämpöarvona, jonka ero kalorimetriseen lämpöarvoon on se, että palaessa syntynyt vesi höyrystyy ja jäähtyy takaisin alkulämpötilaan pysyen höyryn muodossa. Toimituskostean polttoaineen lämpöarvo on alin lämpöarvo, jota laskettaessa käytetään tehollista lämpöarvoa. (Alakangas 2000, s. 12, 27-28)

Lämpöarvo voidaan määrittää kalorimetrisesti, jolloin poltetaan tunnettu määrä polttoainetta puhtaassa hapessa ja mitataan vapautuva energiamäärä. Poltto voi tapahtua esimerkiksi kalorimetrissä. Tällä määrityksellä saadaan näytteen ylempi lämpöarvo, joka voidaan muuntaa alemmaksi eli tehol liseksi lämpöarvoksi yhtälön (1) avulla.

$$Q_{net,v,m} = \left(Q_{gr,v} - 206[H]\right) x \frac{100-M_T}{100-M} - 23M_T \quad (1)$$

missä $Q_{net,v,m}$ on alempi lämpöarvo vakiotilavuudessa yksikössä J/g, M_T polttoaineen kosteuspitoisuus, jolle alempi lämpöarvo lasketaan, $Q_{gr,v}$ on analysoidun näytteen ylempi lämpöarvo vakiotilavuudessa yksikössä J/g ja $[H]$ on analysoidun näytteen vetypitoisuus painoprosenttina. (Raiko et al. 2002, s. 123)

4.2 Kosteus

Kosteus on merkittävä kiinteille polttoaineille määritettävä ominaisuus, johtuen sen suorasta vaikutuksesta teholliseen lämpöarvoon. Kosteus ilmoitetaan yleensä kosteusprosenttina, eli veden prosenttiosuutena aineen kokonaismassasta. Kosteus voidaan ilmoittaa tasapainokosteutena, toimituskosteutena, käyttökosteutena tai tuorekosteutena. Tasapainokosteus on vesimäärä, jonka polttoaine kykenee pitämään tietyissä oloissa, käyttökosteus taas tarkoittaa käyttöön valmiin polttoaineen kosteutta ja tuorekosteus kuivaamattoman polttoaineen kosteutta. Tuorekosteutta käytetään yleensä puupolttoaineiden yhteydessä. (Alakangas 2000, s.12)

Yksinkertaisimmillaan kosteus voidaan määrittää kuivaamalla näyte 105 °C:n lämpötilassa lämpökaapissa ja määrittämällä kuivauksen aikana tapahtunut painonmuutos punnitsemalla. Tämä menetelmä sopii ainoastaan sellaisille näytteille, jotka eivät hajoa lämmön vaikutuksesta eivätkä reagoi ympäröivän kaasukehän kanssa. (Raiko et al. 2002, s. 121-122)

Esimerkiksi tuore puu on tunnetusti kosteaa polttoainetta ja sen kosteus on yleensä 40-60 prosenttia. Puun kosteuteen voivat vaikuttaa useat tekijät, kuten kasvupaikka, puulaji, puun ikä tai vuodenaika. Näiden lisäksi kosteudet vaihtelevat riippuen puun osasta taulukon 2 mukaan. Polttoaineiden käyttötavasta riippuu, miten kosteana polttoainetta voidaan käyttää. Suuremmat laitokset voivat käyttää kosteaa polttoainetta mutta kotitalouksissa käytettävän puun on oltava kuivaa. Tämän takia kotitalouksissa ja maatiloilla käytettävät polttopuut kuivataan ennen käyttöä. (Alakangas 2000, s.40-41)

Taulukko 2. Havupuiden eri osien kosteuspitoisuudet (Alakangas 2000, s. 41)

Puun osa	Kosteuspitoisuus, p-%	
	Mänty	Kuusi
Runkopuu	45-50	40-60
Oksat	50-56	42-46
Latva	60	50-60
Kaarna	36-60	38-58
Muu kuori	53-67	47-63

4.3 Alkuainekoostumus

Kiinteän polttoaineen koostumus voidaan jakaa kolmeen osaan: palavaan ainekseen, tuhkaa muodostavaan epäorgaanisen ainekseen sekä veteen. Näistä tärkein osa polttoainemielessä on palava aines. Tuhkaa muodostava aines sekä vesi taas ovat molemmat polttoaineen laatua heikentäviä tekijöitä. Palavan aineen pääkomponentteja ovat hiili (C), vety (H), typpi (N), rikki (S) ja happi (O). Polttoaineen palamisessa vapautuvan lämmön kannalta näistä merkittävimmät alkuaineet ovat hiili ja vety. Typpi ja rikki taas ovat merkittäviä haitallisten palamistuotteiden lähtöalkuaineita. (Raiko et al. 2002, s.124)

4.4 Haitalliset aineet

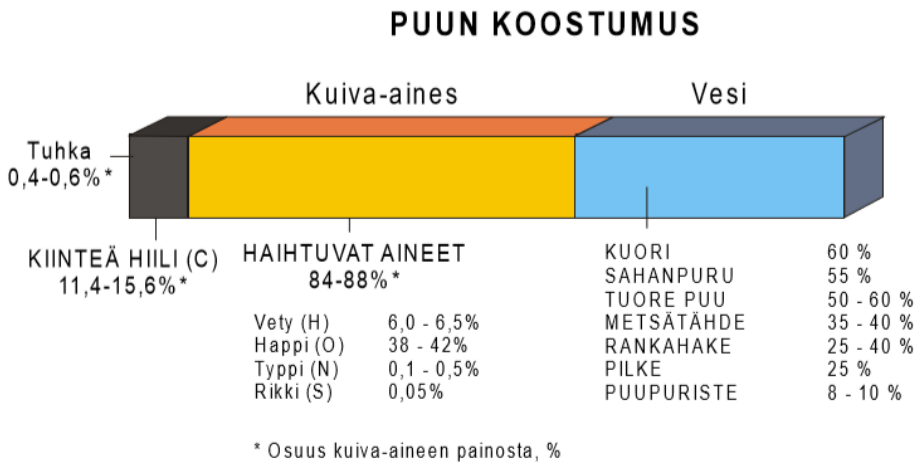
Polttoaineet voivat sisältää myös haitallisia aineita, jotka polton yhteydessä aiheuttavat ongelmia. Näitä ongelmia voivat olla esimerkiksi likaantuminen, kuumakorroosio, nesteen sintraantuminen tai päästöjen muodostuminen. Haitallisia aineita biopolttoaineissa voivat olla esimerkiksi alkalimetallit, kloori, rikki, typpi tai raskasmetallit.

Polttoaineen sisältämät alkalimetallit kuten natrium tai kalium voivat johtaa likaantumiseen, kuumakorroosioon eli korkean lämpötilan korroosioon tai nesteen sintraantumiseen. Myös kloori voi aiheuttaa kuumakorroosiota ja likaantumista, mutta näiden lisäksi myös HCl- päästöjä tai dioksiinien muodostumista. Rikki taas saa aikaan SO_2- päästöjä sekä alhaisen lämpötilan korroosiota. Polttoaineen typpi voi aiheuttaa NO_x-päästöjä. Polttoaineen sisältämät raskasmetallit taas johtavat päästöihin, korroosioon ja aiheuttavat ongelmia tuhkan hoidossa. (Hulkkonen 2006)

4.5 Haihtuvat aineet

Haihtuvat aineet ovat se osa polttoaineesta, joka kaasuuntuu, kun polttoainenäytettä kuumennetaan nopeasti korkeaan lämpötilaan hapettomassa tilassa. Haihtuvien aineiden määrä vaikuttaa liekin käyttäytymiseen. Niiden määrään vaikuttavat useat tekijät kuten lämpötila, paine ja polttoaineen lämpenemisnopeus. Haihtuvien aineiden määritys voidaan tehdä 1 gramman näytteellä standardoidussa kannellisessa upokkaassa. (Raiko et al. 2002, s. 122)

Esimerkiksi puussa haihtuvia aineita on paljon, yleensä noin 80-90 prosenttia. Tästä johtuen puu on pitkäliekkinen polttoaine, joka tarvitsee suuren palotilan. (Alakangas 2000, s. 35)



Kuva 3. Puun koostumus. (Alakangas 2000, s. 35)

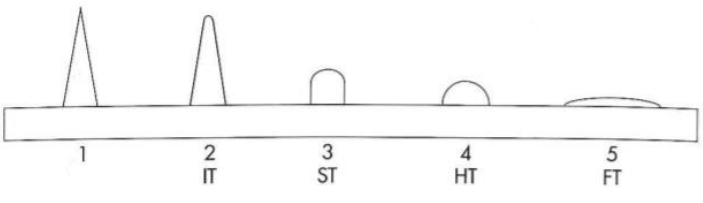
4.6 Tuhka

Tuhka tarkoittaa sitä palamatonta epäorgaanisen aineen massaa, joka jää jäljelle poltettaessa polttoainenäyte täydellisesti hapettavassa kaasukehässä. Tuhkan aiheuttamat ongelmat polton yhteydessä ovat suurin yksittäinen syy kattiloiden ennakoimattomiin alasajoihin. Ongelmia tarkasteltaessa on otettava huomioon tuhkan koko muodostumisketju, joka sisältää polttoaineen syötön, tuhkaa muodostavien ainesosien vapautumisen sekä lentotuhkan erottamisen savukaasuista. Tavallisesti tuhka ilmoitetaan painoprosentteina kuivan aineen painosta. (Raiko et al. 2002, s. 269)

4.6.1 **Tuhkan sulamiskäyttäytyminen**

Tuhkan sulamiskäyttäytyminen on otettava huomioon erityisesti polttotekniikoissa, joissa tuhka poistetaan sulana tai jossa tuhkan sulaminen voi estää polttoilman kulkeutumista. Tuhkan sulamisella voi olla tärkeä merkitys sintraantuminen, kuonaantuminen (slagging) tai likaantumisen (fouling) kannalta. Kuonaantuminen (slagging) on kattilan kuonaantumista tulipesän säteilyalueella, kun taas likaantuminen (fouling) viittaa likaantumiseen kattilan konvektio-osassa. Kuonaantumisesta aiheutuvat kerrostumat ovat usein paksuja ja selvästi sulaneita kun taas likaantumisen aiheuttamissa kerrostumissa lämpötila on alhaisempi ja tuhkakerrostuma on yleensä kiinteässä muodossa. (Alakangas 2000, s.15, 31)

Tuhkan sulamiskäyttäytymisen nykyisissä määrityksissä on neljä vaihetta: muodonmuutoslämpötila (IT), pehmenemislämpötila (ST), puolipallolämpötila (HT) ja juoksevuuslämpötila (FT). Tuhkan sulamiskäyttäytymisen määrityksen standardimenetelmissä tuhkasta valmistettua näytekappaletta kuumennetaan joko hapettomassa tai pelkistävässä tilassa. Kuumennuksen aikana näytekappaleen muodon muutoksia tarkastellaan ja lopulta tuhkan käyttäytymistä kuvataan edellä mainituissa lämpötiloissa. Muodonmuutoslämpötilojen määritysmenetelmät ovat täysin empiirisiä, jolloin niiden avulla ei voida yleensä luotettavasti arvioida esimerkiksi tuhkan kuonaamisominaisuuksia. (Raiko et al. 2002, s.125-126)



Kuva 4. Tuhkan sulamiskäyttäytymisen neljä vaihetta. (Raiko et al. 2002, s. 126)

5 OMINAISUUKSIEN VERTAILU

5.1 Puupolttoaineet

Puupolttoaineet ovat Suomen merkittävin uusiutuvan energian lähde. Taulukossa 3 on listattu Suomessa käytettävien puupolttoaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia, kuten kosteus, tehollinen lämpöarvo, irtotiheys ja energiatiheys. Energiatiheys tarkoittaa lämpöarvoa ilmoitettuna tilavuutta kohti.

Tuore puu on tunnetusti kosteaa polttoainetta ja sen kosteus on yleensä noin 40-60 prosenttia. Puupellettien ja joidenkin metsäteollisuuden sivutuotteiden kosteudet voivat kuitenkin olla huomattavasti alhaisempia. Puun kosteuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten kasvupaikka, puulaji, puun ikä ja vuodenaika. Kosteudella on myös suora yhteys polttoaineen teholliseen lämpöarvoon. Teholliset lämpöarvot kuiva-aineesta ovat puupolttoaineilla samansuuruisia, mutta hieman vaihtelua nähdään tehollisissa lämpöarvoissa saapumistilassa. Saapumistilassa suurimmat lämpöarvot saavat puupelletti sekä kutterinlastu, hiontapöly ja vaneritähdehake. Puupelleteillä myös tiheys ja energiatiheys ovat huomattavasti suurempia kuin muilla puupolttoaineilla.

Taulukko 3. Puupolttoaineiden kosteudet, teholliset lämpöarvot, irtotiheydet saapumistilassa sekä energiatiheydet taulukoituna. (Alakangas 2000, s.152)

Polttoaine	Kosteus, % (hakkeet kaatotuoreena)	Tehollinen lämpöarvo kuiva.aineesta, MJ/kg	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	Irtotiheys saapumistilassa, kg/i- m^3	Energiatiheys, MWh/i- m^3
Metsätähdehake	50-60	18,5-20	6-9	250-400	0,7-0,9
Kokopuuhake	45-55	18,5-20	7-10	250-350	0,7-0,9
Rankahake	40-55	18,5-20	7-11	250-350	0,7-0,9
Kantohake	30-50	18,5-20	8-13	200-300	0,7-1,0
Havupuun kuori	50-65	18,5-20	5-9	250-350	0,5-0,7
Koivun kuori	45-55	21-23	8-11	300-400	0,6-0,9
Pilke	20-25	18,5-19	13,4-14,5	240-320	1,35-1,6 MWH/p- m^3
Puutähdehake	10-50	18,5-20	6-15	150-300	0,7-0,9
Sahahake	45-60	18,5-20	6-10	250-350	0,5-0,8
Sahanpuru	45-60	19-19,2	6-10	250-350	0,45-0,7
Kutterinlastu	5-15	19-19,2	16-18	80-120	0,45-0,55
Hiontapöly	5-15	19-19,2	16-18	100-150	0,5-0,65
Puupelletti	8-10	19-19,2	16,8	500-650	2,9-3,4
Vaneritähde	5-15	19,19,2	16-18	200-300	0,9-1,1

Taulukossa 4 esitetään puupolttoaineiden tuhkapitoisuus sekä alkuainekoostumus. Alkuainekoostumukset eri puupolttoaineilla ovat likimain samat, mutta tuhkapitoisuudet vaihtelevat. Puupolttoaineista hakkeilla ja kuorella on yleisesti ottaen suurimmat tuhkapitoisuudet, kun taas pelleteillä ja metsäteollisuuden sivutuotteilla tuhkapitoisuus on alhaisempi.

Taulukko 4. Puupolttoaineiden tuhkapitoisuudet sekä hiili-, vety-, rikki-, ja typpipitoisuudet kuiva-aineesta. (Alakangas 2000, s. 152)

Polttoaine	Tuhkapitoisuus kuiva-aineesta, %	Hiilipitoisuus kuiva-aineesta C, %	Vety-pitoisuus kuiva-aineesta (H), %	Rikkipitoisuus kuiva-aineesta (S), %	Typpipitoisuus kuiva-aineesta (N), %
Metsätähdehake	1-3	48-52	6-6,2	<0,5	0,3-0,5
Kokopuuhake	1-2	48-52	5,4-6	<0,5	0,3-0,5
Rankahake	0,5-2	48-52	5,4-6	<0,5	0,3-0,5
Kantohake	1-3	48-52	5,4-6	<0,5	0,3-0,5
Havupuun kuori	1-3	48-52	5,7-5,9	<0,5	0,3-0,5
Koivun kuori	1-3	48-52	6,2-6,8	<0,5	0,3-0,5
Pilke	1,2	48-52	6,0-6,5	<0,5	0,3-0,5
Puutähdehake	0,4-1	48-52	5,4-6,4	<0,5	0,1-0,5
Sahahake	0,5-2	48-52	5,4-6,4	<0,5	0,1-0,5
Sahanpuru	0,4-0,5	48-52	6,2-6,4	<0,5	0,1-0,5
Kutterinlastu	0,4-0,5	48-52	6,2-6,4	<0,5	0,1-0,5
Hiontapöly	0,4-0,8	48-52	6,2-6,4	<0,5	0,1-0,5
Puupelletti	0,4-0,5	48-52	6,2-6,4	<0,5	0,1-0,5
Vaneritähde	0,4-0,8	48-52	6,2-6,4	<0,5	0,1-0,5

5.2 Peltobiomassat

Taulukossa 5 esitetään Suomessa käytettävien peltobiomassojen tärkeimpiä ominaisuuksia, kuten kosteus, tehollinen lämpöarvo, irtotiheys ja energiatiheys.

Ruokohelven ominaisuudet riippuvat siitä, onko ruokohelpi kevät- vai syyskorjattu. Keväällä korjattuna ruokohelven kosteus on alhaisempi, jolloin myös tehollinen lämpöarvo on korkeampi. Kevätkorjatun ruokohelven tiheys on myös hieman pienempi verrattuna syyskorjatun ruokohelven tiheyteen. Muuten oljen ja ruokohelven ominaisuuksissa ei tapahdu merkittäviä vaihteluita.

Irtotiheys peltobiomassoilla on huomattavasti pienempi kuin puupolttoaineilla, jonka lisäksi myös energiatiheyden arvot ovat pienempiä. Nämä ominaisuudet johtavat

peltobiomassoilla korkeisiin kuljetuskustannuksiin. Puupolttoaineista esimerkiksi hakkeeseen tai kuoreen verrattuna peltobiomassoilla on kuitenkin pienempi kosteusprosentti.

Taulukko 5. Peltobiomassojen kosteudet, lämpöarvot, irtotiheydet ja energiatiheydet taulukoituna. (Alakangas 2000, s. 153)

Polttoaine	Kosteus, %	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineesta, MJ/kg	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	Irtotiheys saapumistilassa, kg/i- m^3	Energiatiheys, MWH/ m^3
Olki	17-25	17,4	12,4-14,0	80	0,3-0,4
Ruokohelpi, kevätkorj.	15-20	17,1-17,5	13,2-14,2	70	0,3-0,4
Ruokohelpi, syyskorj.	20-30	16,7-17,7	11,0-13,7	80	0,2-0,3

Taulukossa 6 esitetään peltobiomassojen tuhkapitoisuudet sekä alkuainekoostumukset. Peltobiomassoilla suurin tuhkapitoisuus on kevätkorjatulla ruokohelvellä. Alkuainekoostumuksissa peltobiomassojen välillä esiintyy pieniä vaihteluita, mutta ei mitään kovin merkittävää.

Peltobiomassojen tuhkapitoisuudet kuiva-aineesta ovat suurempia kuin puupolttoaineiden tuhkapitoisuudet. Puupolttoaineisiin verrattaessa alkuainekoostumus näyttää suurimmaksi osaksi samanlaiselta, mutta huomattavaa on, että peltobiomassoista löytyy suuremmat typpipitoisuudet.

Taulukko 6. Peltobiomassojen tuhkapitoisuudet ja alkuainepitoisuuksia taulukoituna. (Alakangas 2000, s.153)

Polttoaine	Tuhkapitoisuus kuiva-aineesta, %	Hiilipitoisuus kuiva-aineesta C, %	Vety-pitoisuus kuiva-aineesta (H), %	Rikkipitoisuus kuiva-aineesta (S), %	Typpipitoisuus kuiva-aineesta (N), %
Olki	5	45-47	5,8-6,0	0,01-0,03	0,4-0,6
Ruokohelpi, kevätkorj.	6,2-7,5	45,5-46,1	5,7-5,8	0,08-0,25	0,65-0,25
Ruokohelpi, syyskorj.	5,1-7,1	44,6-46,7	5,6-5,9	0,06-0,25	0,7-1,1

5.3 Haitalliset aineet

Eri polttoaineiden sisältämien haitallisien aineiden tuntemus on tärkeää, sillä haitalliset aineet voivat polton yhteydessä aiheuttaa likaantumista, kuumakorroosiota tai nesteen sintraantumista. Näiden lisäksi ne voivat muodostaa myös päästöjä.

Korkeita alkalipitoisuuksia löytyy muun muassa vaneritähdehakkeesta, metsätähteestä, haavan kuoresta sekä peltobiomassoista. Näiden lisäksi peltobiomassoilla on myös korkea klooripitoisuus.

Taulukko 8. Polttoaineiden sisältämiä haitallisia aineita. (Hulkkonen 2006)

Polttoaine	Korkea alkalipitoisuus	Korkea klooripitoisuus	Korkea rikkipitoisuus	Korkea kosteuspitoisuus	Korkea tuhkapitoisuus
Vaneritähdehake	X				
Metsätähde	X				
Haavan kuori	X				
Oljet	X	X			
Ruokohelpi	(X)	(X)			
Kuori				X	

Taulukossa 7 esitetään peltobiomassoissa esiintyvien haitallisien aineiden pitoisuuksia. Näistä haitallisista aineista natrium ja kalium ovat alkalimetalleja, jotka voivat johtaa likaantumiseen, kuumakorroosioon tai nesteen sintraantumiseen. Kloori taas voi johtaa likaantumisen ja kuumakorroosion lisäksi myös HCl- päästöjen ja dioksiinien muodostumiseen.

Suurin natriumpitoisuus löytyy yleensä oljelta. Syyskorjatun ruokohelven natriumpitoisuus on huomattavasti pienempi kuin kevätkorjatun ruokohelven. Syyskorjatun ruokohelven kaliumpitoisuus taas on peltobiomassoista suurin. Kevätkorjattuun verrattuna kaliumpitoisuus saattaa olla jopa nelinkertainen. Suurimmat klooripitoisuudet löytyvät oljelta sekä kevätkorjatulta ruokohelveltä.

Taulukko 7. Peltobiomassojen haitallisien aineiden pitoisuuksia taulukoituna. (Alakangas 2000 s.153)

Polttoaine	Natrium, Na, %	Kalium, K, %	Kloori, Cl, %
Olki	0,01-0,6	0,69-1,3	0,14-0,97
Ruokohelpi, kevätkorj.	<0,03	0,3-0,5	0,4
Ruokohelpi, syyskorj.	<0,001	1,2-2,3	0,09

5.4 Tuhkan ominaisuudet

Tuhkan koostumuksella ja tuhkan sulamiskäyttäytymisellä on erityisesti merkitystä sellaisissa polttotekniikoissa, joissa tuhkan sulaminen voi estää palamisilman kulkeutumista. Tuhkan pehmeneminen voi aiheuttaa myös kattilan likaantumista. (Alakangas 2000, s.57) Suurimmat tuhkapitoisuudet löytyvät peltobiomassoilta ja pienimmät tuhkapitoisuudet kiinteistä puupolttoaineista koivulta, männyltä ja kuuselta. Tuhkan alkuainekoostumus vaikuttaa esimerkiksi tuhkan sulamiskäyttäytymiseen.

Taulukko 9. Joidenkin kiinteiden polttoaineiden tuhkapitoisuudet sekä tuhkan alkuainekoostumus painoprosentteina alkuaineen oksidina ilmaistuna. (Raiko et al. 2002, s.271)

Puut	tuhka %	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	muu*
Koivu	0,3	0,9			3,5	45,8	11,6	8,7	15,1	2,6	11,8
Mänty	0,2	3,5			2,7	41,8	16,1	3,1	15,3	4,5	13,0
Kuusi	0,3	1,0			2,7	36,8	9,8	3,2	29,6	4,3	12,6
Paju	1,7	0,1	0,1		9,9	33,3	5,1		0,2	2,4	48,9
Kuoret											
Koivu	1,6	3,0		1,0	3,0	60,3	5,9	0,7	4,1		22,0
Mänty	1,8	14,5		3,8	2,7	40,0	5,1	2,1	3,4		28,4
Kuusi	3,4	21,7		1,8	2,7	50,5	4,2	2,8	3,5		12,8
Tammi	1,5	11,1	0,1	3,3		64,5	1,2	8,9	0,2		10,7
Muut											
Olki	5,8	40,0	0,6	0,4	3,1	12,0		0,4	32,0	3,3	8,2
Bagassi	1,8	48,8	6,4	1,9	2,9	3,9	5,5	0,8	18,9	3,5	7,4
Ruokohelpi	8,9	65,7	1,7	1,4	5,0	2,7	1,8	0,3	4,6	1,4	15,4
	* laskettu erotuksena										

Erityisesti kattilan likaantumisen estämisen kannalta on tärkeää tuntea tuhkan sulamiskäyttäytyminen, joka on esitetty taulukossa 10. Nykyisessä tuhkan sulamiskäyttäytymisen määrityksessä on neljä vaihetta, jotka ovat muodonmuutoslämpötila (IT), pehmenemislämpötila (ST), puolipallolämpötila (HT) ja juoksevuuslämpötila (FT). Määritys tehdään joko hapettavassa tai pelkistävässä ilmakehässä, joista saadaan hieman erilaisia tuloksia. Määritysmenetelmä on täysin empiirinen, jolloin sen avulla ei kuitenkaan voida yleensä luotettavasti arvioida esimerkiksi tuhkan kuonaamisominaisuuksia.

Taulukko 10. Puun tuhkan sulamiskäyttäytyminen. (Alakangas 2000, s.38)

Polttoaine	Tuhkan sulamiskäyttäytymien, ˚C							
	Hapettava ilmakehä				Pelkistävä ilmakehä			
	IT	ST	HT	FT	IT	ST	HT	FT
Kokopuuhake, mänty	1210	125	1250	1275	1230	1240	1245	1290
Metsätähdehake	1175	1205	1230	1250	1175	1225	1245	1260
Sahanpuru, mänty	1150	1180	1200	1225	1135	1165	1185	1205
Kuori, kuusi	1405	1550	1650	1650	1565	1580	1650	1650
Kuori, mänty	1340	1525	1650	1650	1375	1504	1506	1507

6 YHTEENVETO

Biopolttoaine on biomassasta valmistettu polttoaine. Biomassoja saadaan useista eri lähteistä kuten metsistä, pelloilta, teollisuuden sivuvirroista ja jätteistä. Biomassoista voidaan jalostaa kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Niitä voidaan tuottaa päätuotantona biopolttoaineiksi tai sivutuotteena esimerkiksi puunjalostusteollisuudesta tai maa- ja metsäteollisuudesta.

Bioenergia on Suomen merkittävin uusiutuvan energian lähde. Selkeästi suurin bioenergian tuottaja ja käyttäjä Suomessa on metsäteollisuus.

Suomessa tällä hetkellä potentiaalisimpia ja käytetyimpiä biopolttoaineita ovat puupolttoaineet ja peltobiomassat. Suomessa käytettäviä kiinteitä puupolttoaineita ovat metsähake, metsätähdehake, metsäteollisuuden sivutuotteet sekä pelletit ja briketit. Merkittävimpiä puupolttoaineita tällä hetkellä ovat metsähake ja kuori. Peltobiomassoja taas voidaan valmistaa ruokohelvistä ja oljesta.

Biopolttoaineita Suomessa voidaan ominaisuuksien mukaan polttaa joko arina- tai leijukerrospoltossa. Arina on kattilan pohjalle sijoitettava polttolaite, jonka päällä kiinteä polttoaine poltetaan joko paikallaan pysyvänä tai hitaasti liikkuvana kerroksena. Leijukerrospoltossa taas polttoaine poltetaan leijutettavan hiekan seassa. Leijukerroskattilat voidaan jakaa kerrosleijukattiloihin ja kiertoleiju- eli kiertopetikattiloihin. Kerrosleijukattilat soveltuvat erityisesti kosteille polttoaineille ja kiertoleijukattilat soveltuvat kosteiden polttoaineiden lisäksi myös esimerkiksi hiilen polttoon.

Polttoaineiden ominaisuudet ovat erityisen tärkeitä polttoteknisistä syistä sekä polttoaineen laadun arvioinnissa. Polttoaineiden ominaisuuksia ovat esimerkiksi lämpöarvo, kosteus ja tiheys. Näistä tärkein on lämpöarvo, joka tarkoittaa palamisessa kehittyvää lämpömäärää. Lämpöarvo voidaan ilmoittaa joko kalorimetrisenä eli ylempänä lämpöarvona tai tehollisena eli alempana lämpöarvona. Kosteus on tärkeä ominaisuus, sillä kosteudella on suora vaikutus teholliseen lämpöarvoon.

Polttoaineiden tärkeitä ominaisuuksia ovat myös alkuainekoostumus, haitalliset aineet, haihtuvat aineet sekä tuhkan ominaisuudet. Kiinteän polttoaineen koostumus voidaan

jakaa kolmeen osaan: palavaan ainekseen, tuhkaa muodostavaan epäorgaaniseen ainekseen ja veteen. Näistä tärkein polton kannalta on palava aines, jonka pääkomponentit ovat hiili (C), vety (H), typpi (N), rikki (S) ja happi (O). Palamisessa vapautuvan lämmön kannalta näistä merkittävimmät alkuaineet ovat hiili ja vety. Typpi ja rikki ovat merkittäviä haitallisten palamistuotteiden lähtöalkuaineita.

Polttoaineen sisältämät haitallisia aineita voivat typen ja rikin lisäksi olla myös alkalimetallit, kloori tai raskasmetallit. Haitalliset aineet voivat polton yhteydessä aiheuttaa likaantumista, kuumakorroosiota, nesteen sintraantumista tai päästöjen muodostumista.

Haihtuvat aineet ovat se osa polttoaineesta, joka kaasuuntuu, kun polttoainenäytettä kuumennetaan nopeasti korkeaan lämpötilaan hapettomassa tilassa. Niiden määrään voivat vaikuttaa useat tekijät kuten lämpötila, polttoaineen lämpenemisnopeus ja paine. Haihtuvien aineiden määrä vaikuttaa liekin käyttäytymiseen. Esimerkiksi puussa haihtuvia aineita on paljon, jopa 80-90 prosenttia.

Tuhkan koostumus ja sulamiskäyttäytyminen ovat erityisen tärkeitä polttotekniikoissa, joissa tuhkan sulaminen voi estää palamisilman kulkeutumista. Tuhkan pehmeneminen voi aiheuttaa myös kattilan likaantumista. Nykyisessä tuhkan sulamiskäyttäytymisen määrityksessä on neljä vaihetta: muodonmuutoslämpötila (IT), pehmenemislämpötila (ST), puolipallolämpötila (HT) ja juoksevuuslämpötila (FT). Näiden määritys on täysin empiiristä. Tuhkan sulamiskäyttäytymisen määrityksen standardimenetelmissä tuhkasta valmistettua näytekappaletta kuumennetaan joko hapettomassa tai pelkistävässä tilassa. Kuumennuksen aikana näytekappaleen muodon muutoksia tarkastellaan ja lopulta tuhkan käyttäytymistä kuvataan mainituissa lämpötiloissa.

LÄHDELUETTELO

Alakangas Eija, 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2045. 172 s. ISBN: 951-38-5699-2

Alakangas Eija, Hurskainen Markus, Laatikainen-Luntama Jaana, Korhonen Jaana, 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Jyväskylä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. ISBN 978-951-38-8419-2

Gasum. Biokaasu osana kiertotaloutta. [Gasumin www-sivut]. [Viitattu: 11.2.2019]. Saatavissa: https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/

Hakala Kaija, Kontturi Markku, ja Pahkala Katri, 2009. Field biomass as a global energy source. Agricultural and Food Science Vol 18: 347-365. 365 s. [verkkoartikkeli]. [viitattu 27.11.2018] Saatavissa: http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2015090311179

Huhtinen Markku et al. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki: Oy Edita Ab. 379 s. ISBN 951-37-3360-2.

Huhtinen Markku et al. 2008. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus. 342 s. ISBN 978-952-13-3476-4.

Hulkkonen Seppo, 2006. CHP generation from biomass fuels Part 2, Biomass fuels and conversion technologies. 5Eures International training, Joensuu. [Dia-esitys]. [Viitattu 11.2.2019].

Huttunen Riku, 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11.4.2019]. Saatavilla: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6

Jääskeläinen Anna-Stiina, Sundqvist Henna, 2007. Puun rakenne ja kemia. Helsinki: Otatieto. 142s. ISBN 978-951-672-351-1

Knuuttila Kirsi, 2003. Puuenergia. Jyväskylä: Jyväskylän Teknologiakeskus Oy, BENET Bioenergiaverkosto. 115s. ISBN 952-5165-20-5

Luke Luonnonvarakeskus, 2018. Puun energiakäyttö uuteen ennätykseen 2017. [Luke Luonnonvarakeskuksen www-sivut]. [viitattu 11.2.2019]. Saatavissa: https://www.luke.fi/uutiset/puun-energiakaytto-uuteen-ennatykseen-2017/

Maa- ja metsätalousministeriö. Suomessa uusiutuvasta energiasta suurin osa on bioenergiaa. [Maa- ja metsätalousministeriön www-sivut]. [viitattu 11.2.2019]. Saatavissa: https://mmm.fi/luonto-ja-ilmasto/bioenergian-tuotanto

Mohammad Ali Abdoli, Abooali Golzary, Ashkan Hosseini, Pourya Sadeghi, 2018. Wood Pellet as a Renewable Source of Energy. University of Tehran Science and Humanities Series, Iran. 183 s. ISBN 978-3-319-74482-7. [e-kirja]. [viitattu 4.3.2019]. Saatavissa: https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-74482-7.pdf

Motiva, 2018. Bioenergia. [Motivan www-sivut]. [viitattu 11.2.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia

Pahkala Katri, Lötjönen Timo, 2015. Peltobiomassat tulevaisuuden energiaresurssina. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 58 s. [verkkojulkaisu]. [viitattu 27.11.2018]. Saatavissa: http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/519929/luke-luobio_55_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Putula Joel, Hiili Anu, 2017. Hakkeen laatuun vaikuttavat tekijät. Oulun ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitystyön julkaisut ISSN 1798-2022. 13 s. [verkkojulkaisu]. [viitattu 4.3.2019]. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/134175/ePooki%2030_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Raiko Risto, Saastamoinen Jaakko, Hupa Mikko, Kurki-Suonio Ilmari. Poltto ja Palaminen. Jyväskylä. ISBN 951-666-604-3

Ranta Tapio, Karhunen Antti, Laihanen Mika, 2017. Factors behind the development of forest chips use and pricing in Finland. [verkkoartikkeli]. [viitattu 28.11.2018].

Rosillo-Calle Frank, de Groot Peter, Hemstock Sarah L., Woods Jeremy, 2007. The biomass assessment handbook: bioenergy for a sustainable environment. London, Sterling, VA. 263 s. ISBN: 987-1-84407-526-3

Suomen biokaasuyhdistys, 2019. Biokaasu. [Suomen biokaasuyhdistyksen www-sivut]. [viitattu 16.2.2019]. Saatavissa: http://www.biokaasuyhdistys.net/tietoa-biokaasusta/

Tilastokeskus 2007. Suomi on bioenergian suurvalta. [verkkojulkaisu]. [viitattu 8.3.2019]. Saatavissa: http://www.stat.fi/artikkelit/2007/art_2007-04-18_004.html?s=0

Tilastokeskus 2018. Uusiutuvan energian käyttö jatkoi kasvuaan vuonna 2017. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11.12.2018]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehk/2017/ehk_2017_2018-12-11_tie_001_fi.html

Pohjois-Savon ELY-keskus, 2016. Puupolttoaineiden käyttö energiantuotannossa - Pohjois-Savo. [Ympäristö.fi www-sivut]. [viitattu 11.2.2019]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Ymparistön_tilan_indikaattorit/Ilmastonmuutos_ja_energia/Puupolttoaineiden_kaytto_energiantuotann(40110)

Villa Aki, Saukkonen Pasi, 2010. Bioenergia 2020 : arvioita kasvusta, työllisyydestä ja osaamisesta. Työ ja elinkeinoministeriö. 68 s. ISBN: 978-952-227-341-3