

JÄTEPERÄISTEN PELLETTIEN OMINAISUUDET JA LUOKITTELU

CASE: Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy

Tiivistelmä

Tekijä Launonen, Jesse Joonas Petteri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 66	Valmistumisaika Syksy 2018
Työn nimi Jäteperäisten pellettien ominaisuudet ja luokittelu CASE: Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy		
Tutkinto Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö suoritettiin Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy:lle tarkoituksena selvittää polttoaineiden jatkojalostusmahdollisuutta. Työhön liittyi kierrätysjakeiden pelletointi, polttokokeet ja ulkopuolisten tahojen kokeiden tarkastelu. Opinnäytetyössä tarkasteltiin polttoaineen pelletoinnin hyötyjä ja käytännön ongelmia, pelletoinnin sekä polttokokeiden ajalta.</p> <p>Koepelletoinnissa käytettiin SRF:ää (Solid Recovered Fuel) ja kierrätyspuuta eri seossuhteissa. SRF, eli kierrätyspolttoaine, on jätehuollon keräämästä yhdyskuntien tuottamasta jätteestä jatkojalostettua jätepolttoainetta, jota poltetaan jätteenpolttolaitoksissa. Kyseisen materiaalin kuljetuksessa, säilytyksessä ja käyttämisessä on haasteita, jotka voivat ratketa puristamalla polttoaine tiiviimmäksi pelletiksi.</p> <p>Polttolaitoksissa poltetaan myös kierrätyspuuta, joka on yksityisiltä ja teollisuudelta tullutta jättepuuta. Puu on pelleteissä perinteisempi materiaali, ja myös polttolaitokset maksavat siitä enemmän, vaikka energiasisällöltään SRF onkin parempaa.</p> <p>Kyseiset materiaalit aiheuttivat ongelmia pellettien puristamisessa ja myöhemmin myös koepolttoja suoritettaessa. Mahdollisesti oikeanlaisilla laitteilla kokeet olisivat onnistuneet paremmin, mutta sekin on vain hyödyllistä tutkimustietoa jatkotutkimuksia varten.</p>		
Asiasanat SRF, puumurske, kierrätyspuu, kierrätyspolttoaine, pelletti, jätehuolto		

Abstract

Author Launonen, Jesse Joonas Petteri	Type of publication Bachelor's thesis	Published Autumn 2018
	Number of pages 66	
Title of publication Properties and classification of waste origin pellets CASE: Päijät-Häme Waste Management Ltd		
Name of Degree Bachelor of Engineering		
Abstract <p>The thesis was commissioned by Päijät-Häme Waste Management Ltd. The purpose of the study was to clarify potential possibilities further processing of fuels. The work involved the pelletizing of recycled fractions, burning experiments and studying previous research related to this project. Benefits and downsides of further processing were considered during manufacturing and testing the pellets.</p> <p>Different mixture rations of SRF (Solid Recovered Fuel) and recycled wood were used for making pellets to clarify the qualities of the different fuels. SRF is refined waste that originates from urban areas and the industry. It is used for energy production at incineration plants. There are some challenges with the transporting, storing and using of SRF that could be solved by compressing the fuel into a more solid pellet.</p> <p>Recycled wood is also used for the production of energy at incineration plants. Recycled wood also originates from private consumers and the industry. Wood is a more traditional material for pelletizing and it is also more wanted by the incineration plants, so it is more valuable fuel than SRF even though the energy content of SRF is better.</p> <p>Waste fuels caused problems during the project in compressing the pellets and during the burning experiments. Possibly the use of more proper equipment could have given better results. However, results of this study are beneficial for additional studies</p>		
Keywords SRF, crushed wood, recycled wood, recovered fuel, pellet, waste management		

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	PELLETÖINNISSÄ KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT	2
3	KOEPelletTÖINTI	10
4	KOEPOLTTO	18
4.1	Koelaitteisto	18
4.2	Puupelletti	19
4.3	Kierrätyspuupelletti	22
4.4	25 % SRF ja 75 % kierrätyspuu -seos	25
4.5	50 % SRF ja 50 % kierrätyspuu -seos	28
5	POLTTOKokeiden MITTAUKSET JA POLTTOA KOSKEVAT RAJOITTEET	32
5.1	Standardit ja lainsäädäntö	32
5.2	Polttokokeiden valmistelut	36
5.3	Kosteuspitoisuus	37
5.4	Tuhkapitoisuus	38
5.5	Savukaasuanalyysi	39
6	TULOKSET	41
6.1	Koepoltot	41
6.2	Rinnakkaiskokeet	54
6.3	Seospelletöinnin kannattavuus	58
7	YHTEENVETO	61
	LÄHTEET	63
	LIITTEET	65

1 JOHDANTO

Kiertotalouden tavoittelu ja pyrkimykset jätemäärien vähentämiseksi luovat maailmalla uusia tuotteita ja työpaikkoja. Tämä opinnäytetyö liittyy jätteen hyötykäyttöön, koska tavoitteena on jalostaa jätettä, jotta sillä olisi parempi hyötykäyttöarvo. Jätehierarkiassa jätteen polttaminen on melko matalalla, mutta Suomen olosuhteissa jätteen polttaminen on aivan pätevä keino tuottaa energiaa ja lämpöä. Jätteitä polttamalla säästyy neitseellisiä luonnonvaroja, esimerkiksi hiiltä ja öljyä.

Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy, myöhemmin PHJ, on kymmenen kunnan omistama osakeyhtiö, joka huolehtii lainmukaisista jätehuollon tehtävistä. PHJ:n alueella asuu yli 200 000 ihmistä ja yrityksiä on noin 13 000. Yhtiön tavoitteena on kehittää jätehuoltoa tehokkaammaksi vastaamaan kiertotalouden haasteisiin luonnonvarojen käyttö ja ympäristön suojele huomioiden. (PHJ 2018b.)

Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy suunnitteli ja toteutti SRF- ja puumurskepolttoaineiden koepelletöinnin, joka oli osa polttoaineiden jatkojalostuskartoitusta. Kokeilla oli tarkoitus saada konkreettisia tutkimustuloksia kyseisten materiaalien soveltuvuudesta pelletointiprosessiin ja koepellettien laadullisista tekijöistä.

Pellettiolomuoto tuottaa lisäarvoa materiaalille sekä helpottaa kuljetusta, säilöntää, käsittelyä ja polttoaineen määrän säätelyä polttolaitoksissa. Pelletit ovat huomattavasti tasalaatuisempia kuin jalostamaton jättepolttoaine, joten polttolaitoksien polttoprosessi helpottuisi. Varsinkin kuljetuksessa säästöt voivat olla huomattavat, koska kevyitä, huokoisia polttoaineita kuljetettaessa tilavuusraajat voivat tulla vastaan ennen painorajaa. Tutkimuksessa keskityttiin juuri pelletteihin ja niiden ominaisuuksiin, mutta myös kannattavuutta arvioitiin ja pellettejä koskevista rajoitteista otettiin selvää.

Seospelletit valmistettiin Konepaja M. Pappinen Oy:n toimesta Joensuussa, jossa myös Karelia-ammattikorkeakoulu suoritti omat seospellettien polttokokeensa. SGS Finland Oy suoritti polttoaineille ja materiaaleille analyysit, joita tarkastellaan tässä opinnäytetyössä. SGS Finland Oy on maailman johtava tarkastus-, verifiointi-, testaus- ja sertifiointiyritys, jonka Kotkan toimipisteellä laboratorioanalyysit suoritettiin. Omat polttokokeet suoritettiin Lahden Energon Oy:n pienessä poltinlaboratoriossa, jossa kosteuspitoisuutta lukuun ottamatta kaikki mittaukset suoritettiin.

2 PELLETOINNISSÄ KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT

Koepelleteissä käytettiin kahta jätelajiketta: kierrätyspuuta sekä SRF:ää (Solid Recovered Fuel), eli kiinteää kierrätyspolttoainetta. Energiasisällöltään SRF on puuta parempaa, mutta polttoaineena puusta maksetaan enemmän (liite 1).

Liitteestä 1 nähdään puun ja SRF:n hintaero kohden MWh. Liitteestä 1 nähdään myös yksi potentiaalisesti hyvä sekoitussuhde seospelletille, joka on 36 % puuta ja 64 % SRF:ää. Luvut perustuvat PHJ:n Lahti Energialle toimittamiin vuosittaisiin jätemääriin, jotka sekoittamalla kyseinen seossuhde saadaan. Kyseinen seossuhde on määriin suhteutettuna ideaalinen, mutta seossuhteen valintaan vaikuttaa myös muita tekijöitä, kuten hinta, pellettien ominaisuudet ja päästöt.

SRF on tavanomaisesta yhdyskuntien ja yritysten tuottamasta kuivista syntyipaikoilla lajitelluista jätteistä mekaanisella käsittelyprosessilla valmistettua polttoainetta, jota käytetään energian talteenottoon poltto- tai rinnakkaispolttolaitoksissa (SFS-EN ISO 15359, 2011, 12). Kujalan jätekeskuksessa polttoainetta säilytetään sään armoilla ulkotiloissa, joten se on vaihtelevan laatuista ja keskimääräinen kosteuspitoisuus on 23 %. Tuore, juuri murskaimen läpi ajettu SRF, on kosteudeltaan keskimäärin 12 % (Suhonen Consulting Oy 2017).

Suuremman mittakaavan pelletöinneissä materiaaleja on mahdollisesti kuivatettava ennen prosessia tai varastoitava siten, että kosteutta ei pääse materiaaliin. Pelletöintiprosessissa syntyy kitkan takia lämpöä, mutta se ei ehdi kuivattamaan materiaalia tarpeeksi. Lisäksi veden höyrystyminen voi tapahtua vasta laitteen sisällä matriisin kanavassa, jolloin sisälle syntyy painetta mahdollisesti aiheuttaen epätoivottuja haasteita.

SRF, jonka kosteuspitoisuus on 12 %, on energiatiheydeltään parempaa kuin kostea 23 %:n polttoaine. Kosteuspitoisuudeltaan kuivemman energiatiheys on 4,8 MWh/t, kun taas kosteamman energiatiheys on 4,17 MWh/t. (Suhonen Consulting Oy 2017.) Kosteuspitoisuudeltaan tasalaatuinen sekä myös muuten tasalaatuinen tuote on mahdollista myydä paremmalla hinnalla kuin käsittelemätön ja vaihtelevalaatuinen tuote.

Kierrätyspuu on käytännössä tavallista puuta, mutta ikä, kosteuspitoisuus ja rakenne vaihtelevat. Tavallisen puupelletin puumateriaali on hyvin homogeenistä puuta, joten se eroaa koostumukseltaan kierrätyspuusta. Pellettimateriaali sisältää mahdollisesti purkupuuta, joten mukana tulee pintakäsittelyaineita, kuten lakkaa ja maalia. Taulukossa 1 on listattu maalien alkuainepitoisuuksia ja siitä nähdään, että erot pitoisuuksissa maalien kesken ovat huomattavan suuria.

Taulukko 1. Maalien alkuainepitoisuuksia (Korri 2011, 51)

Alkuaine	Yksikkö	Vesiohenteinen akryyli- maali	Alkydihartsimaali	Vanhat maalit (yli 40 vuotta)
Natrium	%	0,7 - 0,9	-	-
Alumiini	mg/kg	1 - 1,5	-	-
Elohopea	mg/kg	-	400	-
Kadmium	mg/kg	-	11700	-
Hiili	%	26,9 - 50,3	-	10,88 - 47,28
Happi	%	37,4 - 42,3	-	31,11 - 387
Kalsium	mg/kg	27000 - 94000	-	-
Magnesium	mg/kg	9000 - 13000	-	-
Antimoni	mg/kg	-	600	-
Lyijy	mg/kg	-	300	1300 - 1900
Kromi	mg/kg	-	100	29400 - 70800
Sinkki	mg/kg	-	-	7000 - 32600
Arseeni	mg/kg	-	100	-
Barium	mg/kg	-	600	-
Pii	mg/kg	32000 - 52000	-	7700 - 61000
Titaani	mg/kg	38000 - 125000	-	213300 - 494800
Seleeni	mg/kg	-	800	-

Kierrätyspuun seassa voi myös olla metalleja, kuten nautoja tai ruuveja. Myös pintakäsittelyaineet voivat sisältää metalleja. PHJ:n murskaimessa on metallinerottimet, mutta niistä huolimatta sekaan jää pieniä määriä metalleja. Suhonen Consulting Oy:n (2017) raportin mukaan erottelutekniikkana voidaan tulevaisuudessa käyttää kaksivaiheista magneettia ferriittisten metallien poistamiseen ja gravimetrisiä erottimia kivien ja hiekan poistamiseen. Tämänkaltaisella erottelulla päästään 90-95 % tehokkuuteen. (Suhonen Consulting Oy 2017.) Kuvassa 1 on kierrätyspuuta, jota käytettiin pellettien valmistuksessa.



Kuva 1. Kierrätyspuuta pelkän PHJ:n murskaimen läpi ajettuna

PHJ:n lajitteluohjeen perusteella saa kuvan, minkälaista materiaalia kierrätyspuu on. Lajitteluohjeen mukaan puujätteeseen saa laittaa lautoja, lankkuja, kuormalavoja, vaneria, lastu-, kuitu-, MDF- ja melaniinilevyjä, laminaatteja, parketteja, listoja, puisia verhoilemattomia huonekaluja ja kalusteita. Puu saa olla maalattua ja sisältää nauvoja, heloja ja vetimiä. Kierrätyspuupelleiteissä käytetään myös risujätettä, eli kaikkia puiden ja pensaiden oksia, pensasaitoja ja pensaiden juurakoita, joista on ravisteltu mullat pois. (PHJ 2018a.)

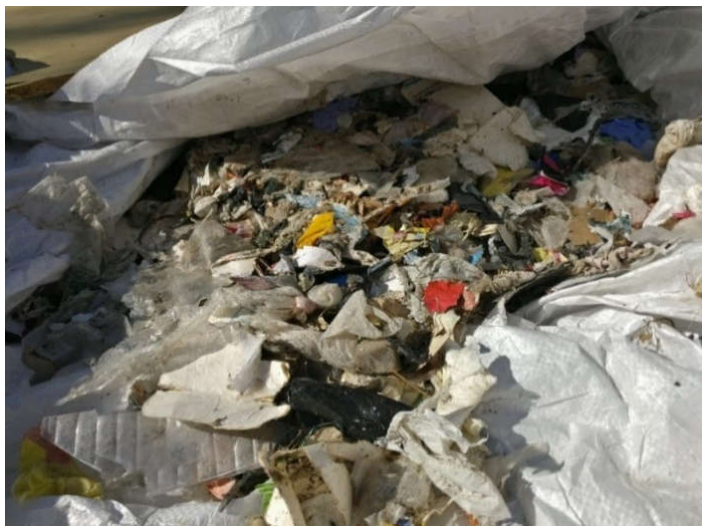
Tilastokeskus (2018, 5) määrittelee kierrätyspuun biopolttoaineeksi, jos siihen ei sisälly muovipinnoitteita, halogenoituja orgaanisia yhdisteitä tai raskasmetalleja. Kyseisiä pinnoitteita ja aineita sisältävät puut luokitellaan purkupuuksi, joka luokitellaan sekapolttoaineeksi, kuten myös kierrätyspolttoaineet. (Tilastokeskus 2018, 7)

Taulukossa 2 on SGS Finland Oy:n puumurskeen analyysiraporteista kerättyä dataa. Puumurskeesta on lähetetty kolme eri näytettä eri ajankohtina SGS Finland Oy:lle analysoitavaksi. Taulukosta 2 nähdään, että puumurske on lähtökohtaisesti melko kostea, suurimmillaan kosteusprosentin ollessa jopa 21 %. Kyseiset näytteet on otettu tippuvasta virrasta, eli varastoituu verrattuna näytteet voivat olla kuivempia. Näytteissä on havaittavissa eroavaisuuksia, kun taulukkoa 2 tarkastellaan lähemmin. Esimerkiksi viimeisessä näytteessä on huomattavasti vähemmän alumiinia, arseenia, lyijyä ja sinkkiä kuin aiemmissa näyte-erissä.

Taulukko 2. Puumurskeanalyysien tulokset (SGS Finland Oy 2018)

	1/2017	7/2017	8/2017
Kosteus	21,1 %	17,0 %	15,7 %
Lämpöarvo, kalorimetrinen, vedetön	19,92 MJ/kg	19,77 MJ/kg	20,02 MJ/kg
Lämpöarvo, tehollinen, vedetön	18,58 MJ/kg	18,66 MJ/kg	18,82 MJ/kg
Lämpöarvo, tehollinen, saapumistilassa	14,18 MJ/kg	16,01 MJ/kg	15,50 MJ/kg
Tuhka 550 °C, vedetön	1,46 %	3,00 %	1,30 %
Kloori, vedetön	<0,060 %	0,060 %	<0,050 %
Rikki, vedetön	0,018 %	0,031 %	0,012 %
Typpi, vedetön	-	1,44 %	0,96 %
Kalium	520 mg/kg	490 mg/kg	570 mg/kg
Natrium	370 mg/kg	370 mg/kg	580 mg/kg
Alumiini	600 mg/kg	740 mg/kg	160 mg/kg
Arseeni	19 mg/kg	32 mg/kg	4 mg/kg
Kadmium	<0,3 mg/kg	<0,3 mg/kg	<0,3 mg/kg
Koboltti	<1 mg/kg	2 mg/kg	<1 mg/kg
Kromi	27 mg/kg	42 mg/kg	24 mg/kg
Kupari	27 mg/kg	32 mg/kg	28 mg/kg
Elohopea	<0,06 mg/kg	<0,10 mg/kg	<0,10 mg/kg
Mangaani	70 mg/kg	79 mg/kg	74 mg/kg
Nikkeli	<1 mg/kg	6 mg/kg	3 mg/kg
Lyijy	52 mg/kg	99 mg/kg	15 mg/kg
Antimoni	<6 mg/kg	<6 mg/kg	<6 mg/kg
Tallium	<1,0 mg/kg	<0,2 mg/kg	3,0 mg/kg
Vanadiini	<1 mg/kg	2 mg/kg	<1 mg/kg
Sinkki	210 mg/kg	290 mg/kg	96 mg/kg
Tina	<10 mg/kg	<10 mg/kg	<10 mg/kg

Suomen standardisoimisliiton mukaan kiinteät kierrätyspolttoaineet, eli SRF, tuotetaan tavanomaisesta jätteestä, jota voi olla esimerkiksi tuotantokohtainen jäte, kiinteä yhdyskuntajäte, teollisuusjäte, kaupan jäte, rakennus- ja purkujäte sekä jätevesiliete (SFS-EN ISO 15359, 2011, 6). Kuvassa 2 on SRF:ää, jota käytettiin pellettien valmistuksessa.



Kuva 2. Kiinteää kierrätyspolttoainetta eli SRF:ää

PHJ:n lajitteluoppaan mukaan energiantuotantoon käytetään energia- ja sekajätettä. Kummastakin hyödynnetään kierrätettävät materiaalit, mutta loput menevät MURRE-murskauslaitoksen kautta ja jalostetaan SRF:ksi. Kuten kierrätyspuusta aiemmin, SRF:stäkin saa materiaalina paremman kuvan, kun tarkastellaan PHJ:n lajitteluohjeita, mitä energiajätteeseen saa laittaa: elintarvikemuovit eli purkit, pussit, rasiat, kääreet ja alustat sekä muovituotteet, jotka on merkitty tunnuksilla 01, 02, 04, 05, 06 tai 07. Tällaisia tuotteita ovat esimerkiksi pullot, ämpärit ja kanisterit. Lisäksi energiajätteeseen kuuluvat valokuvat, filmit, Styrox-tuotteet, kertakäyttöastiat, likaiset kartonkiastiat, maalatut-, lakatut-, puunsuojakäsitellyt- tai muovipinnoitetut puupalat, lastulevyt, vaahtomuovit, vaatteet, kodin tekstiilit, kevytpeitteet, harsot, verkot, pakkausvanteet, narut, nauhat ja kynttilänkannat. (PHJ 2018a.)

Sekajätteeseen saa laittaa paljon myös energiantuotantoon kelpaamatonta jätettä, mutta ne lajitellaan ennen jalostusta pois. Sekajätteeseen kuitenkin saa laittaa kahvi- ja sipsipussit, tyhjät lääkepakkaukset, alumiinia sisältävät pakkaukset, vaipat, siteet, muut hygieniatuotteet, kengät, kumi- nahka- ja tekonahkatuotteet, PVC- muovit ja muut tunnistamattomat muovituotteet, kumipohjaiset matot, lamput, sulakkeet, peilit, posliinit, keramiikkaa, lasit, pölynimuripussit, tupakantumpit, purukumit, tuhkat, suuret luut, elintarvikkeita sisältävät pakkaukset, kasetit, levyt ja niiden kotelot (PHJ 2018a). Sekajätteestä lajitellaan ener-

giantuotantoon kelpaamaton jäte erilleen, joten SRF:n seassa ei ole suuria määriä polttoon kelpaamattomia materiaaleja. Edelliset listaukset havainnollistavat seka- ja energiajätteiden eroa ja sitä, minkälaisia polttoon kuulumattomia materiaaleja SRF:ään lajittelusta huolimatta saattaa joutua.

Taulukossa 3 on SGS Finland Oy:n analyysiraportit SRF:n sisällöstä. SRF:stä on lähetetty kolme eri näytettä eri ajankohtina SGS Finland Oy:lle analysoitavaksi. SRF on huomattavasti puumursketta kuivempaa ja lämpöarvoltaan parempaa. Tuhkapitoisuus taas on puuhun verrattuna moninkertainen. Näytteet on otettu tippuvasta virrasta, eli varastoituu verrattuna näytteet voivat olla kuivempia. Mahdollisesti tulevaisuudessa, jos seospellettejä aletaan tehdä suuremmissa mittakaavassa, materiaaleja on kuivatettava ennen pelletöintiä. Jos materiaalit otettaisiin suoraan PHJ:lle tulevasta jätevirrasta, olisi se todennäköisesti kuivempaa kuin ulkona säilytetty, eikä sitä välttämättä tarvitse kuivata.

Taulukossa 4 on kerätty SGS Finland Oy:n analyysiraporttien tuloksista keskiarvot ja laitettu vertailun helpottamiseksi samaan taulukkoon. SRF on arvojen puolesta polttoaineena parempaa, mutta tuhkapitoisuus ja tietyt päästöt siinä ovat paljon puumursketta korkeammat. Kalium, natrium, alumiini, kadmium, koboltti, kromi, kupari, nikkeli, antimoni, tallium, vanadiini, sinkki ja tina ovat pitoisuuksiltaan korkeammat, kun taas rikki, arseeni, mangaani ja lyijy ovat matalammalla.

Taulukko 3. SRF:n analyysiraportit (SGS Finland Oy 2018)

	5/2015	11/2015	5/2016
Kosteus	8,0 %	8,3 %	14,4 %
Lämpöarvo, kalorimetrinen, vedetön	25,50 MJ/kg	24,13 MJ/kg	23,58 MJ/kg
Lämpöarvo, tehollinen, vedetön	23,90 MJ/kg	22,57 MJ/kg	22,12 MJ/kg
Lämpöarvo, tehollinen, saapumistilassa	21,80 MJ/kg	20,51 MJ/kg	18,60 MJ/kg
Tuhka 550 °C, vedetön	7,34 %	15,50 %	10,10 %
Kloori, vedetön	0,22 %	0,36 %	0,74 %
Rikki, vedetön	0,076 %	0,12 %	0,12 %
Kalium	710 mg/kg	8900 mg/kg	970 mg/kg
Natrium	1600 mg/kg	1100 mg/kg	1900 mg/kg
Alumiini	2200 mg/kg	1100 mg/kg	5800 mg/kg
Arseeni	4 mg/kg	<1 mg/kg	<2 mg/kg
Kadmium	1,5 mg/kg	7,2 mg/kg	2,7 mg/kg
Koboltti	2 mg/kg	3 mg/kg	3 mg/kg
Kromi	27 mg/kg	25 mg/kg	60 mg/kg
Kupari	31 mg/kg	64 mg/kg	32 mg/kg
Elohopea	<0,1 mg/kg	<0,10 mg/kg	<0,10 mg/kg
Mangaani	49 mg/kg	68 mg/kg	82 mg/kg
Nikkeli	5 mg/kg	8 mg/kg	23 mg/kg
Lyijy	38 mg/kg	44 mg/kg	22 mg/kg
Antimoni	16 mg/kg	<6 mg/kg	<6 mg/kg
Tallium	<0,4 mg/kg	<0,4 mg/kg	7,0 mg/kg
Vanadiini	3 mg/kg	9 mg/kg	2 mg/kg
Sinkki	300 mg/kg	300 mg/kg	340 mg/kg
Tina	<10 mg/kg	<10 mg/kg	22 mg/kg

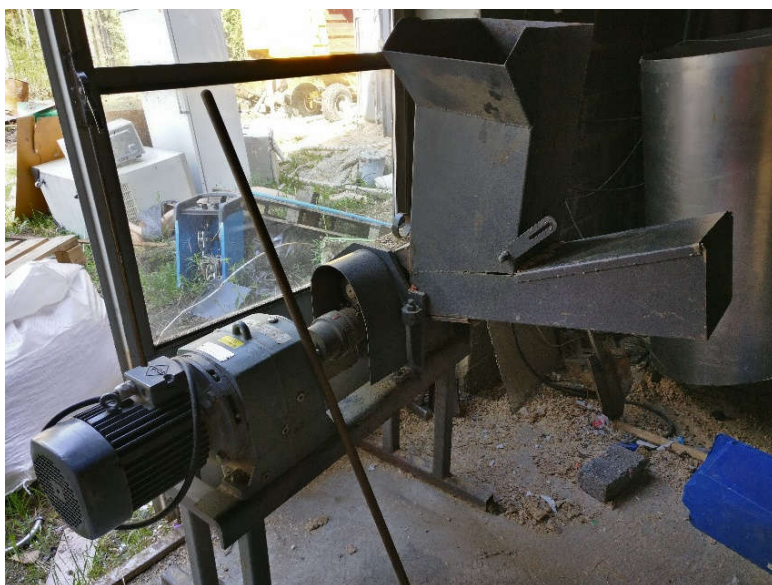
Taulukko 4. SRF- ja puumurskeanalyysien keskiarvot (SGS Finland Oy 2018)

	SRF	Puumurske
Kosteus	10,2 %	17,9 %
Lämpöarvo, kalorimetrinen, vedetön	24,4 MJ/kg	19,9 MJ/kg
Lämpöarvo, tehollinen, vedetön	22,86 MJ/kg	18,69 MJ/kg
Lämpöarvo, tehollinen, saapumistilassa	20,30 MJ/kg	15,23 MJ/kg
Tuhka 550 °C, vedetön	10,98 %	1,92 %
Kloori, vedetön	0,44 %	0,057 %
Rikki, vedetön	0,11 %	0,020 %
Typpi, vedetön	-	1,2 %
Kalium	3527 mg/kg	527 mg/kg
Natrium	2833 mg/kg	440 mg/kg
Alumiini	3033 mg/kg	500 mg/kg
Arseeni	<2,3 mg/kg	18,3 mg/kg
Kadmium	3,8 mg/kg	<0,3 mg/kg
Koboltti	2,7 mg/kg	<1,3 mg/kg
Kromi	37,3 mg/kg	31 mg/kg
Kupari	42,3 mg/kg	29 mg/kg
Elohopea	<0,10 mg/kg	<0,087 mg/kg
Mangaani	66,3 mg/kg	74,3 mg/kg
Nikkeli	12 mg/kg	<3,3 mg/kg
Lyijy	34,6 mg/kg	55,3 mg/kg
Antimoni	<9,3 mg/kg	<6 mg/kg
Tallium	<2,7 mg/kg	<1,4 mg/kg
Vanadiini	4,7 mg/kg	<1,3 mg/kg
Sinkki	313 mg/kg	199 mg/kg
Tina	<14 mg/kg	<10 mg/kg

3 KOPELLETÖINTI

Pelletöinti suoritettiin Konepaja M. Pappinen Oy:n toimesta. Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy toimitti paikanpäälle tarvittavat materiaalit, eli kaksi suursäkillistä kumpaakin, SRF:ää ja kierrätyspuuta. Lisäksi paikalle toimitettiin kontillinen purua. Kyseiset materiaalit edustavat tyypillisiä jäteperäisiä jakeita, joita PHJ tulisi käyttää seospelleteissä.

Materiaalin palakoko oli saapuessaan liian suurta pellettipuristimelle. Jakeet oli ajettu PHJ:n murskaimen läpi, jonka palakoko on P63, joten materiaali ajettiin Konepaja M. Pappinen Oy:n toimesta HylisShredder 3 kW -hienomurskaimella (kuva 3) pienemmäksi ja sen jälkeen vielä Sami-Rivakka 7,5 kW -vasaramyllyllä hienoksi jakeeksi käyttämällä 8 mm reikäseulaa (Konepaja M. Pappinen Oy 2018). Palakoko P63 tarkoittaa, että suurin osa, eli 60%, murskaimen läpi ajetuista kappaleista on kooltaan 3,15 mm - 63 mm. Suurimmat yksittäiset palaset voivat maksimissaan olla 350 mm pituudeltaan.



Kuva 3. Konepaja M. Pappinen Oy:n hienomurskain

Materiaalit esikäsiteltiin ajamalla ne HylisShredder 3 kW -hienomurskaimen läpi, jotta aine olisi sopivaa Sami-Rivakka 7,5 kW -vasaramyllylle, jolla suoritettiin materiaalien lopullinen hienonnus pellettikonetta varten (Konepaja M. Pappinen Oy 2018). Pellettiaineksen tulee olla hienoudeltaan tasalaatuista ja kosteuden olla alle 15 % (Konepaja M. Pappinen Oy 2018). Taulukossa 5 on raaka-aineiden kosteuspitoisuudet prosessin eri vaiheissa ja taulukossa 6 raaka-aineiden tilavuuspainot.

Taulukko 5. Raaka-aineiden kosteusmittaukset (Konepaja M. Pappinen Oy 2018)

Puumurskeen kosteuden keskiarvo	21,1 %
SRF jakeiden kosteuden keskiarvo	19,4 %
Purkupurun kosteuden keskiarvo	9,6 %
Hienonnettu murske kosteuden keskiarvo	16,7 %
Hienonnettu SFR kosteuden keskiarvo	8,5 %

Taulukko 6. Raaka-aineiden tilavuuspainot (Konepaja M. Pappinen Oy 2018)

Tuote	Irtotiheys kg/m ³
Hienonnettu puumurske	143
Puumurske	180
Purkupuru	270
SRF	95
Hienonnettu SRF	63
Puupelletti	610 - 620
50 % SRF / 50 % kierrätyspuu	520 - 530
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	620 - 640

Kierrätetty puu on Konepaja M. Pappinen Oy:n (2018) mukaan pellettimateriaalina hankala, koska se on niin vanhaa puuta, että siitä ovat kadonneet kaikki uuteaineet ja jäljellä on vain pelkkä puun solukko. Kuvassa 4 on vasemmalla kierrätyspuusta tehtyä purua ja oikealla vertailun vuoksi tuoretta kutterinpurua. Kädellä koskettaessa tuore puru on huomattavasti kosteampaa, kun taas kierrätyspuu on hyvin kuivaa.

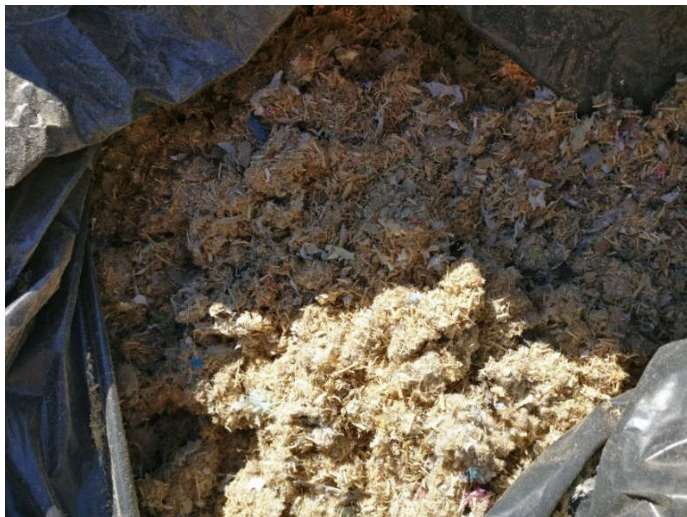


Kuva 4. Vasemmalla kierrätyspuuta vasaramyllyn läpi ajettuna ja oikealla tuoretta purua SRF:lle tehtiin samat esikäsittelytoimenpiteet, eli ajettiin murskaimella pienemmäksi ja sen jälkeen hienonnettiin vasaramyllyllä (kuva 5). Vasaramyllyllä hienonnettu SRF on hyvin huokoista ainetta, aivan kuin pumpulia. Materiaalissa voisi olla potentiaalia lämmöneristeeksi.



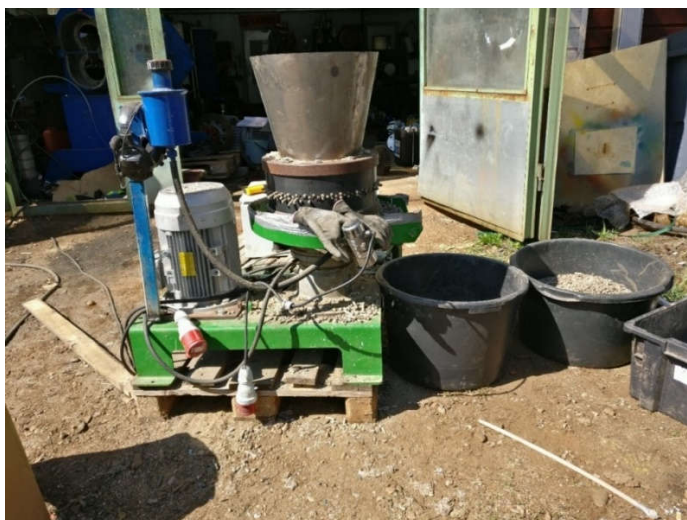
Kuva 5. Vasemmalla SRF:ää hienomurskaimen läpi ajettuna ja oikealla vielä lisäksi vasaramyllyllä hienonnettua

Ensimmäisen murskaimen jäljiltä SRF oli suurirakeista, mutta hienomurskauksella seassa oli vain muutamia suurempia sattumia. Hienonnuksen jälkeen kierrätyspuru ja SRF sekoitettiin keskenään haluttuun seossuhteeseen. Sekoitus tapahtui annostelemalla oikeat mitasuhteet kumpaakin jaetta säkkiin ja sekoittamalla (kuva 6). Puru on painoltaan ja kooltaan pienempää, joten se valui helposti säkin pohjalle eikä sekoittunut kunnolla. (Konepaja M. Pappinen Oy 2018.)



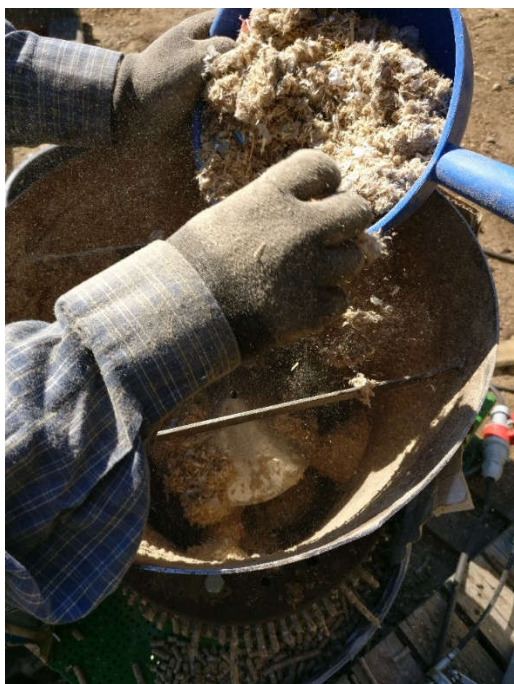
Kuva 6. Valmis kierrätysmateriaaliseos

Pellettipuristin oli Konepaja M. Pappinen Oy:n valmistama HyllicPress MP 60, teho 5,5 kW, joka näkyy kuvassa 7. Puristimessa käytettiin pelletöinnin aikana vain yhtä matriisia. Koepolttimeen käy vain tietyn kokoiset pelletit, joten pellettien piti olla samaa kokoa. Matriisin puristuskanavat olivat 35 mm halkaisijan ollessa 8 mm. Matriisi määrittelee, kuinka hienoksi raaka-aine on jauhettava ennen pelletöintiä. (Konepaja M. Pappinen Oy 2018.)



Kuva 7. Konepaja M. Pappinen Oy:n valmistama pellettipuristin, jolla pelletöinti suoritettiin

Pellettipuristin on lähtökohtaisesti tarkoitettu puupellettien valmistamiseen, joten SRF:n koostumus toi haasteita itse pelletointiprosessiin. Polttoaineseos ei virtaa puristimeen yhtä sulavasti kuin pelkkä puu, vaan sitä joutuu manuaalisesti syöttämään (kuva 8). SRF:ään oli sekoitettu kierrätyspuuta, mutta puulla oli taipumus valua pohjalle, kun taas SRF jäi pidemmäksi aikaa pyörimään syöttötorveen. (Pappinen 2018.)



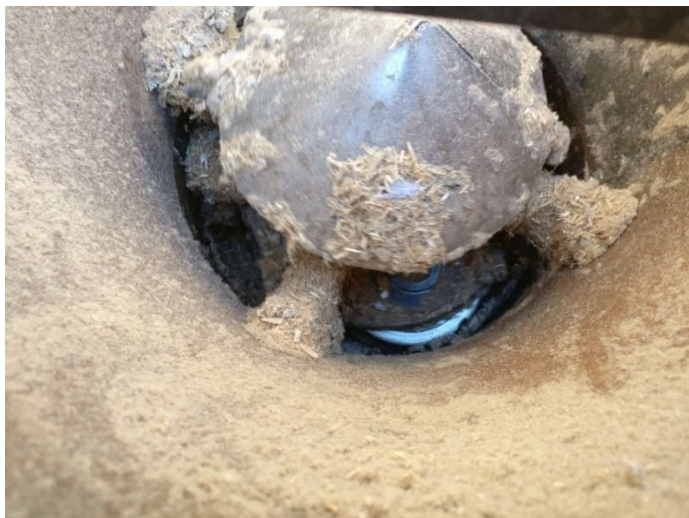
Kuva 8. Raaka-aineen syöttämistä manuaalisesti

Seoksella, jossa on 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta, syöttöongelma oli jo niin suuri, että se selvästi vaikutti tuottavuuteen negatiivisesti. Suuri muovin osuus myös vaikutti koostumukseen niin paljon, ettei pelleleistä tullut kovin isoja ennen katkeamista ja tuotos oli huokoista. Vika ei Karelia-ammattikorkeakoulun (2018) mukaan ole raaka-aineessa, vaan siinä, että pellettipuristin ei soveltunut kyseiselle seokselle.

Seoksen, jossa on liikaa SRF:ää, viskositeetti muuttuu aineen lämmitessä juoksevaan muotoon. Muutos aiheuttaa sen, että pellettipuristimen puristuksen aiheuttavat kolleripyörät eivät pysty puristamaan raaka-ainetta matriisin reikiin, vaan raaka-aine kulkee aaltomaisesti pyörien edellä puristavaa voimaa karkuun. (Konepaja M. Pappinen Oy 2018.)

Kuvassa 9 on puristimen keskiö, jossa kolme kolleripyörää puristaa raaka-ainemassaa kovalla paineella matriisia vasten. Kuvassa 9 näkyy pyörän edellä kulkeva muovimassa-aalto, joka on seurausta lämmön aiheuttamasta viskositeetin muutoksesta. Myös aukot, joista raaka-aine valuu pyörien puristettavaksi, ovat liian ahtaat SRF:lle. Kevyt raaka-aine

ei usein itse tavoita puristinta, vaan sitä täytyy auttaa kepillä menemään syvemmälle. Normaalitylanteessa pellettilaitteen materiaalinsyöttö voidaan toteuttaa ilman tämän kaltaista manuaalista työtä.



Kuva 9. Puristimen keskiö, jossa on kolme puristavaa kolleripyörää

Koepelletöinnin perusteella voidaan todeta, että SRF- ja kierrätyspuumurskeet eivät suoraan sovellu käytettäväksi sellaisissa pelletöintilaitteissa, jotka on suunniteltu erilaisten tuoreiden puujakeiden pelletöintiä varten. Koepelletöinnin aikana haasteita esiintyi varsinkin materiaalin syöttövaiheessa. Nyt suoritettussa pelletöinnissä prosessiin jouduttiin syöttämään materiaaleja manuaalisesti, sillä kevyt SRF ei painu tarpeeksi syvälle syöttötorveen. Lopulta, kun materiaali on valunut tarpeeksi syvälle, kolleripyörä ei pysty tehokkaasti puristamaan massaa kanaviin saakka.

Mikäli seospelletöintiä aletaan tulevaisuudessa tehdä isommassa mittakaavassa, täytyy erilaiseen raaka-aineeseen kiinnittää huomiota jo puristuslaitteen suunnitteluvaiheessa. Puulle suunniteltuja laitteita ei ole optimoitu kierrätysmateriaaleille. Syöttöongelmat vaikuttavat tuottoon hyvin paljon, ja työntekijä joutuu koko ajan olemaan läsnä syöttämässä lisää raaka-ainetta koneeseen. Syöttötorvi on tehtävä vapaammaksi, jotta kevyt SRF ei jää rakenteisiin kiinni, vaan valuu itse perille asti. Muovin viskositeettiongelma ei todennäköisesti ole aivan niin helposti ratkaistavissa, mutta ongelma häviää, kunhan SRF:n pitoisuus ei nouse liian korkeaksi. Seoksessa, jossa on 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta, ei ollut viskositeettiongelmaa. Koostumus oli huomattavasti parempi kuin 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta -seoksessa. Kuvista 10 - 12 näkee eron tuotteiden koostumuksessa.



Kuva 10. 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta sisältäviä pellettejä



Kuva 11. 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta sisältäviä pellettejä



Kuva 12. Pelkkää kierrätyspuuta sisältäviä pellettejä

Pellettikone käy kuumana prosessin aikana, koska materiaalien puristaminen ahtaisiin kammioihin aiheuttaa paljon kitkaa. Kuumassa lämpötilassa syntyy parempia pellettejä, koska muovi ja puun omat sidosaineet pehmenevät ja tuotteesta tulee tiiviimpi. Kun laite on liian viileä, esimerkiksi kun se on vasta käynnistetty, pelleteistä tulee huonolaatuisempia. Lämpötila vaihtelee eri tekijöiden takia, mutta se pyrittiin pitämään 80 - 90 °C:ssa. Koostumukseen vaikuttaa myös, jos syötettävässä raaka-aineessa on isoja paloja tai jos kierrätyspuu valahtaa pohjalle ja SRF jää itsestään pyörimään puristimeen. (Pappinen 2018.)

Pelkkää kierrätyspuuta sisältävien pellettien valmistuksessa oli myös ongelmia, mutta eri syistä. Raaka-aine oli mahdollisesti hyvinkin vanhaa, kuivaa puuta, josta ovat kadonneet kaikki liukasteena toimivat ainesosat, joten jäljellä on vain kuitua. Koepelletöinnin perusteella kierrätyspuumurskeeseen tuleekin lisätä lisääaineita, jotta se soveltuisi käytettäväksi pellettien raaka-aineena. (Pappinen 2018.) Kierrätyspuusta tehtyjä pellettejä on kuvassa 12.

Kuvista 10-12 näkee hyvin eron koostumuksessa. Paljon SRF:ää sisältävä pelletti on lyhyt ja huokoista höttöä. Kierrätyspuupelletti on pitkä, hyvin kovaa ja kiiltävää. 25 % SRF / 75 % kierrätyspuu on siltä väliltä. Välimallin pelletti on aistinvaraisesti tarkasteltuna koostumukseltaan paras ja Karelia-ammattikorkeakoulun (2018) tekemän mekaanisen kestävyysmittauksen mukaan 25 % SRF / 75 % kierrätyspuu on kestävämpää kuin 100 % kierrätyspuupelletti. Se on myöskin lähimpänä todennäköistä haettua seossuhdetta, joka on suhde, jolla SRF:ää ja kierrätyspuupolttoainetta myydään eteenpäin.

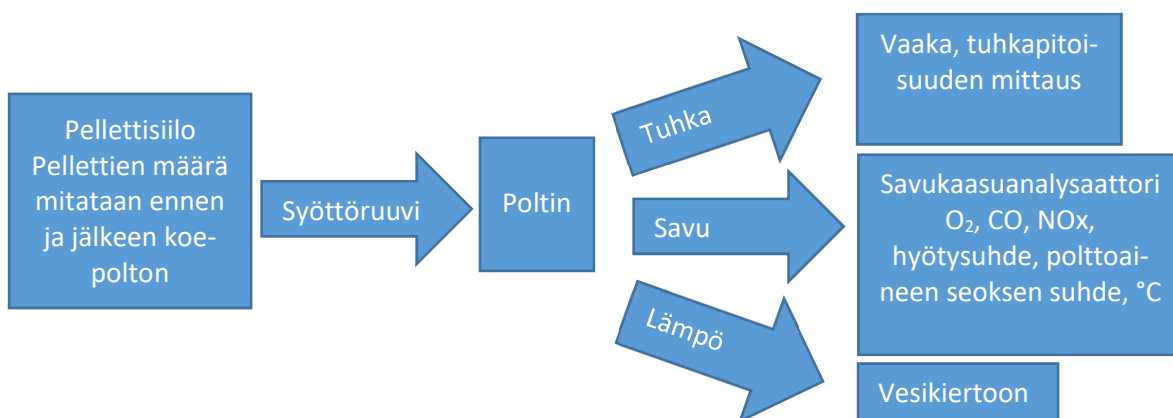
4 KOEPOLTTO

4.1 Koelaitteisto

Koepoltto suoritettiin Lahdessa Energon Oy:n tiloissa. Pieni polttinlaboratorio oli varattu koekaitamme varten. Koepoltot suoritettiin Oilonin Biopro-pellettipolttimella, joka on tarkoitettu puupelleteille. Kuvassa 13 näkyy koelaitteisto, jossa vasemmalla voidaan nähdä pellettsiilo, josta pelletit kuljetetaan syöttöruuvilla polttimeen, joka on kiinni kattilassa. Kattila on harmaa kuutio kuvan keskellä ja itse polttin on kattilasta ulkoneva valkoinen laatikko. Tikkaiden oikealla puolella on ohjauskaappi ja työpöytä, jonka päällä on muun muassa mittauslaitteistoa ja tietokone tallentamassa dataa. Tikkaiden yläpuolella vasemmalla näkyvät tulo- ja menovesiputket ja paksummat putket ovat savukaasuja varten. Kattilana toimii Jäsperi Pelletti XL, polttoaineen syöttöruuvina SPG:n 15w pelleteille tarkoitettu sähkömoottori ja pellettsiilo on Mafa:n valmistama. Kuviossa 1 on havainnollistettu laitteiston toiminta ja se, mitä mittauksia kokeissa suoritetaan.



Kuva 13. Vasemmalla Energon Oy:n pienen polttinlaboratorion laitteisto, jolla koe suoritetaan ja oikealla lähikuva polttimen tiedoista



Kuvio 1. Koelaitteiston prosessikaavio

Kuvassa 14 näkyy polttimen poltinputki, jossa on arina ja arinan alla sytytyselementti. Arinan yläpuolella putken takaseinässä on polttoaineen syöttöaukko, jonka edessä on ohjausluukku, joka estää pellettejä lentämästä liian kauas arinasta. Arinan alapuolella on aukko, josta polttimen puhallin tarvittaessa puhaltaa ilmaa arinan läpi. Kuvassa 15 näkyy kattilan palotila, jossa on tuhka-astia. Ennen jokaista polttoa kaikki laitteet puhdistettiin ja tarkastettiin, että kaikki toimii. Säiliö ja syöttöputki tyhjennettiin, ettei mihinkään jää väärää polttoainetta.



Kuva 14. Poltinputken perällä näkyy polttoaineen syöttöaukko, ohjausluukku ja arina



Kuva 15. Puhdas poltin, palotila ja tuhka-astia

4.2 Puupelletti

Versowood Hotti -pelleteillä (kuva 16) suoritettiin useita harjoituspoltoja ennen varsinaisia koepoltoja. Harjoituspoltoilla haluttiin varmistaa, että kokeet varmasti onnistuvat. Kokeen suorittajan tulee osata käyttää mittauslaitteita ja pellettipoltinta moitteettomasti, jotta

kokeet onnistuvat ja tulokset ovat vertailukelpoiset. Lisäksi kaupan puupelletit toimivat hyvänä vertailukohteena jäteperäisille pelleteille.



Kuva 16. Versowood Hotti -puupellettiä, jota käytettiin verrokipellettinä

Puupelletit olivat ulkonäöltään vaaleita, kiinteitä, kiiltäviä ja melko lyhyitä. Kuviossa 2 on pellettipussin sisällysluettelo, jossa kerrottiin pellettien sisällöstä ja ominaisuuksista. Pellettien valmistuksessa oli käytetty laatuvaatimukset SFS-EN ISO 17225-2 -standardia, joka määrittelee polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat puupelleteille ei-teollisuuskäyttöön.

Verso Hotti-lämmityspelletti

HOTTI-pelletit valmistetaan kotimaisesta, uusiutuvasta raaka-aineesta. Lämmityspelletti on siisti, ympäristölle ystävällinen ja ekologisesti kestävä vaihtoehto niin isojen kuin pientenkin tilojen lämmitykseen.

VALMISTUSMAA:	Suomi
VALMISTAJA:	Versowood Oy
RAAKA-AINE:	Puubiomassa (1.2)
PUULAJI:	Kuusi ja mänty
OMINAISUUDET:	Halkaisija 8 ± 1 mm (D 08)
	Pituus $3,15 \leq L \leq 40$ mm, pellettejä joiden pituus on yli 40 mm voi olla max.1 paino-%.
	Mekaaninen kestävyys $\geq 97,5$ % (DU 97.5)
	Hienoaines ≤ 1 paino-% (F 1.0) ¹⁾
	¹⁾ Ajoneuvoon lastattuna tehtaalla. Hienoainespitoisuus toimitusehtojen mukaisesti.
LÄMPÖARVO:	$\geq 4,6$ kWh/kg (Q 4.6)
OMINAISPAINO:	650 kg/irto- $m^3 \pm 5$ %, standardin mukainen vähimmäistiheys ≥ 600 kg/irto- m^3
KOSTEUSPITOISUUS:	≤ 10 % (M 10)
TUHKKA:	$\leq 0,5$ paino-%
KLOORI:	$\leq 0,02$ paino-% (CL 0.02)
RIKKI:	$\leq 0,03$ paino-% (S 0.03)
TYPPI:	$\leq 0,3$ paino-% (N 0.3)
LISÄAINEET:	Sideaineita ≤ 2 paino-%
SÄILYTYS:	Kuivassa tilassa, sateelta suojattuna
ERÄKOKO:	Kuluttajasäkki 20 kg, suursäkki 500 kg, irtotavara toimitus puhallusautolla
LAATUKRITEERISTÖ:	SFS-EN ISO 17225-2 Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja -luokat

Kuvio 2. Vertailupellettien sisältö (Versowood 2018)

Polttokoe suoritettiin 23.5.2018 kello 11:15 – 14:15. Puupelletit paloivat odotetusti hyvin, eikä suuria ongelmia itse polttoprosessissa ollut. Savukaasumittari sammui kerran koepolton aikana, koska palamisen laadussa tapahtui muutos ja häikäpitoisuus kasvoi liian korkeaksi. Korkea häikäpitoisuus saattaa aiheuttaa savukaasumittarin anturin hajoamisen, joten mittari kytki mittausasennon pois päältä, kun anturi mittasi liian korkeita pitoisuuksia.

Polttimen termostaatti oli kytketty lämpötilaan 75 °C. Kattilan lämpötilamittari näytti aloitettaessa 51 °C, ulosvirtaava vesi oli 43 °C ja sisääntuleva vesi 45 °C. Lopetettaessa samat mittarit näyttivät 75 °C, 59 °C ja 53 °C. Kattilan pumppu pumppasi koko polton ajan noin 1400 kg/h. Kattilan paine oli aloitettaessa 1 bar ja lopetettaessa 1,1 bar.

Puupellettejä oli aloitettaessa 23,3 kg ja lopetettaessa 7,3 kg, joten päivän aikana poltettiin noin 16 kiloa. Tuhkaa syntyi 180,6 g, joka jaetaan poltettujen pellettien määrällä ja saatiin tuhkapitoisuudeksi 1,1 %. Tulos oli korkeampi kuin sisällysluettelo kertoi, mutta se saattoi osaltaan selittyä pienestä palamisen laadun heittälystä. Kuvassa 17 näkyy palotila polttamisen jälkeen ja poltosta jääneet tuhkat.



Kuva 17. Puupelletistä jääneet tuhkat

Kuvassa 18 näkyy polttimen palotilan perällä palamatonta puupellettiä, joka oli tipahtanut arinan päälle palamisen loppumisen jälkeen. Palamattomat pelletit kerättiin pois tuhkan seasta ennen painon mittausta, jottei tulos vääristy. Pelletit ovat saattaneet tippua palotilaan kattilan luukkua avatessa, koska syöttöputki on kiinni ovesta olevassa polttimessa.



Kuva 18. Palotila puupelletin polttamisen jälkeen

4.3 Kierrätyspuupelletti

Kierrätyspuupelletti oli viimeinen poltettava pellettilajike, koska se tuli muita pellettejä myöhemmin polttokokeisiin mukaan. Ensivaikutelma pelleteistä oli hyvä: pinta oli kiiltävä, väri tummempi kuin normaalissa pelletissä, koostumus kova ja pelletit olivat pitkiä (kuva 19). Valmistuksessa oli käytetty kierrätyspuuta neitseellisen puun sijasta, joten raaka-aine oli mahdollisesti kuivempaa kuin normaali pellettimateriaali.

Esivalmisteluiltaan kierrätyspuupelletit erosivat siinä, ettei niitä oltu levitetty laboratorion lattialle kuivumaan, kuten muut pelletit aiemmin. Kosteusmittaus kuitenkin kertoi, että kosteusluokka oli sama kuin muissakin pelleteissä, joten käytännössä eroa ei ollut.



Kuva 19. Kierrätyspuupellettiä

Kierrätyspuupelletin koepoltto suoritettiin 6.6.2018 10:00-12:45. Polttokokeet alkoivat käynnistyshäiriöllä, joka johtui tukoksesta pellettisiilon alapäässä (kuva 20). Pelletit ovat huomattavan pitkiä, joten se saattoi olla tukoksen aiheuttaja. Tukos kuitenkin aukesi hyvin helposti ja polttimeen syötettiin reilusti pellettejä, jotta sytytys onnistuisi.



Kuva 20. Siilon alaosa, jossa tukos tapahtui

Hetkellisesti kierrätyspuupelletti paloi erittäin hyvin, mutta pian häiriöitä alkoi ilmetä. Yhtäjaksoista palamista jatkui noin vartin jaksoissa, jotka päättyivät käyntihäiriöihin. Poltin ei sammunut, mutta vaikutti, että polttimen automatiikka sammutti liekin lopettamalla puhalluksen. Pian kuitenkin palaminen jatkui, kunnes sama häiriö tapahtui uudestaan. Kokeen lopussa häiriöitä tuli jo viiden minuutin välein, joten koepoltto lopetettiin.

Tuhkia tarkastellessa seasta löytyi huomattavan paljon sintraantunutta tuhkaa, eli huokoista, metallimaista kovettumaa, joka oli ilmeisesti tukkinut arinan. Kuvassa 21 näkyy tuhka-astia, jossa arina, palamattomia pellettejä ja sintraantunutta tuhkaa. Pellettien alkupaino oli noin 18 kg ja loppupaino 12 kg, joten kokeessa poltettiin 6 kg jätepellettiä. Tuhkan määrä oli 79,4 g, ja kun se jaettiin poltettujen pellettien määrällä, saatiin tuhkapitoisuudeksi 1,5 %.



Kuva 21. Polttokokeiden jälkeiset tuhkat

Polttimen termostaatti oli kytketty lämpötilaan 75 °C. Kattilan lämpömittari näytti aloitettaessa 31 °C, poisvirtaava vesi oli 30 °C ja sisääntuleva vesi 32 °C. Polttokokeiden jälkeen mittarit näyttivät samassa järjestyksessä 55 °C, 45 °C ja 44 °C. Kattilan vesipumppu pumppasi koko kokeen ajan 1400 kg/h. Kattilan paine oli aloitettaessa 0,8 bar ja lopetettaessa 0,9 bar.

Sintraantunutta tuhkaa oli tuhkan seassa huomattavan paljon ja isoin yksittäinen kappale oli 7,6 g painoltaan ja kaikki löytyneet yhteensä 17 g. Kuvassa 22 näkyy isoimpia kappaleita sintraantuneesta tuhkasta. Kun sintraantuneen tuhkan määrää verrattiin kokonaistuhkan määrään, huomattiin sen olevan 21 % koko tuhkan pitoisuudesta. Sintraantunutta tuhkaa oli siis yksi viidesosa koko tuhkan määrästä, joten se oli huomattavan paljon. Sintraantunut tuhka voi heikentää lämmön siirtymistä, aiheuttaa virtausvastuksia savukaasuille ja kerrostumien poisto voi olla työlästä (Vilenius 2014).



Kuva 22. Tuhkan seasta löytynyttä sintraantunutta tuhkaa

4.4 25 % SRF ja 75 % kierrätyspuu -seos

Ensimmäinen poltettava kierrätyspolttoaineseos sisälsi 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta. Ensivaikutelma oli hyvä; väri oli vaalea ja seassa näkyi erivärisiä muovin paloja. Kaupalliseen puupellettiin verrattuna pinta oli huokoisempi ja matta (kuva 23). Osa pelleteistä oli hyvin pitkiä ja osa lyhyitä, koska valmistettaessa pelletit katkesivat usein muovin kohdalta. Pellettien valmistaja Pappinen (2018) kertoi, että lisäaineilla näistäkin pelleteistä saa tarvittaessa vielä parempia. Karelia-ammattikorkeakoulun (2018) mukaan jo oikealla laitteistolla saa parempia, joten lisäainetta ei välttämättä edes tarvita.

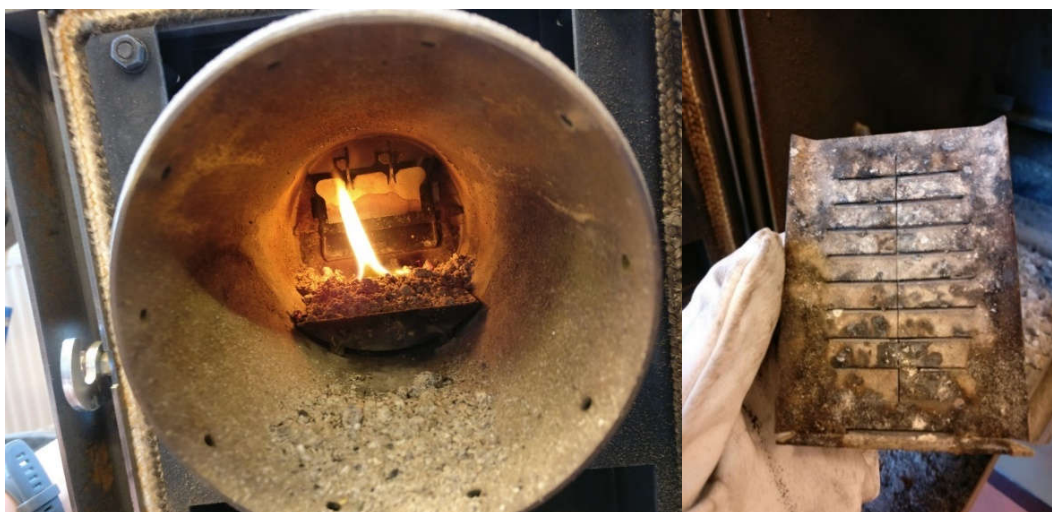


Kuva 23. 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta sisältävää seospellettiä

Seospellettien polttokoe suoritettiin 24.5.2018 9:30-15:00. Pellettien aloituspaino oli vajaa 25,7 kg ja lopetettaessa 18,4 kg. Poltettu määrä on 7,3 kg, josta tuli 270 g tuhkaa, joten tuhkapitoisuus on 3,7 %.

Polttimen termostaatti oli kytketty lämpötilaan 75 °C koko polttokokeiden ajan. Kattilan lämpömittari näytti aloitettaessa 40 °C, poivirtaava vesi oli 31 °C ja sisään tuleva vesi 33 °C. Kokeiden jälkeen lämpötilat samassa järjestyksessä olivat 61 °C, 33 °C ja 49 °C. Kattilan vesipumppu pumppasi kokeiden ajan 1400 kg/h paineen ollessa aloitettaessa 0,85 bar ja lopetettaessa 1 bar.

Koepoltto alkoi hyvin, mutta noin puolen tunnin polttamisen jälkeen tuli ensimmäinen häiriö. Poltin sammui, yritti automaattisesti käynnistää itsensä uudelleen ja epäonnistui. Palotila tyhjennettiin, puhdistettiin ja tarkastettiin, että kaikki on kunnossa ja ehjää, jonka jälkeen tehtiin uusi käynnistysyritys. Poltin toimi noin vartin, jolloin sama häiriö ilmeni uudestaan. Tehtiin uusi käynnistysyritys, mutta sama ongelma toistui vielä kolmannen kerran. Palotilaa tarkastettaessa sisällä oli musta muovinen savu ja arinan päältä löytyi palava polttoainekasa (kuva 24). Palotila puhdistettiin uudestaan ja vauriot tarkastettiin. Arinassa oli hieman sulanutta muovia, mutta se oli niin vähäistä, ettei se ollut ongelma.



Kuva 24. Vasemmalla palotilaan arinan päälle sammuttamisen jälkeen jäänyttä palavaa polttoainetta ja oikealla lähikuva arinasta, johon oli hieman sulanut kiinni muovia

Puhdistuksen jälkeen yritettiin uutta käynnistystä, joka epäonnistui. Arinan päällä ei ollut yhtään polttoainetta käynnistyneen jälkeen, joten heräsi epäily, että syöttöputkessa on tukos. Syöttöputken pikakiinnitys avattiin ja alas polttimeen katsottaessa havaittavissa oli selvä tukos (kuva 25).



Kuva 25. Tukos polttoaineen syöttöputkessa

Tukos avattiin rautalangan avulla (kuva 26). Palotilasta päin katsoessa syöttöaukkoon oli vielä jäänyt jumiin pellettejä. Ilmeisesti sulanut muovi kykeni jumittamaan pelletin syöttöaukkoon. Puhaltimen sammuesssa syöttöputken lämpötila oli todennäköisesti päässyt liian korkeaksi ja pelletit sulivat kuumaan metalliin. Polttimen olisi pitänyt varoittaa kyseisestä häiriöstä, mutta häiriövalo ei syttynyt.



Kuva 26. Syöttöputken tukoksen aukaiseminen rautalangan avulla

Polttokokeet jatkuivat katkonaisina, koska poltin ei syttynyt kunnolla, vaan antoi häiriövaloa epäonnistuneesta käynnistysyrityksestä. Välillä sytytys onnistui ja pelletit paloivat hyvin noin 10-15 minuutin sarjoina, kuten kuvassa 27.



Kuva 27. 25 % SRF / 75 % kierrätyspuu-pelletti paloi parhaimmillaan erinomaisesti

Syöttöputkeen pyrki muodostumaan tukosta koko ajan, mutta rautalangan avulla syöttöputki pysyi auki. Syöttö toimi, mutta jostain syystä poltin sammui aina hetken palamisen jälkeen. Todennäköisesti polttimen oma automatiikka sammuttaa polttimen, koska puhallus vain loppuu yhtäkkiä, aivan kuin poltin tarkoituksella lopettaisi polttamisen. Poltin oli tarkoitettu puupelleteille ja seospelletti ilmeisesti paloi liian eri tavalla siihen verrattuna (Ekholm 2018a). Päivän ongelmat eivät välttämättä olleet pellettien syytä, vaan poltin oli vääränlainen. Tuhkaa tarkastellessa seasta löytyi paljon huonosti palanutta materiaalia ja sintrausta (kuva 28). Sintraus voi olla syynä joihinkin sammumisiin, vaikka poltin puhdistettiin monien polttojen välissä.



Kuva 28. Tuhkan seassa ollutta sintrausta ja palamattomia pellettejä

4.5 50 % SRF ja 50 % kierrätyspuu -seos

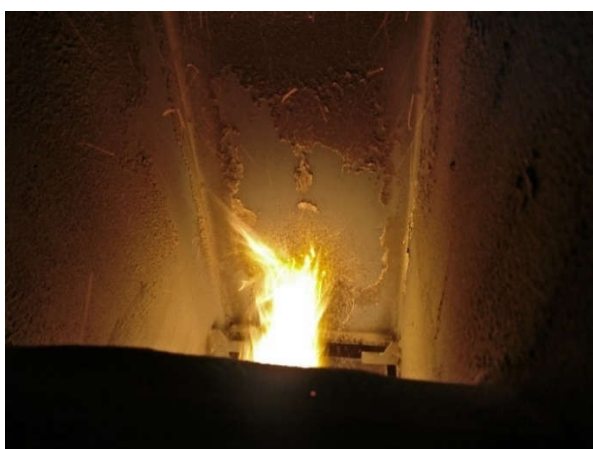
Seospelletit, jotka koostuivat puoliksi SRF:stä ja puoliksi kierrätyspuusta, koepoltettiin Energon Oy:n pienessä poltinlaboratoriossa 25.5.2018 kello 10:30-14:00. Pelletit ovat ensivaikutelman mukaan melko huokoisia, mattapintaisia, hauraita ja lyhyitä (kuva 29).

Jotkin yksittäiset pelletit olivat melko pitkiä. Lisäaineilla tai oikeanlaisella pellettipuristimella koostumusta pystytään parantamaan huomattavasti. Pellettien aloituspaino on 14,2 kg ja lopetuspaino 9,9 kg, joten kokeessa poltettiin noin 4,3 kg. Tuhkan määrä on 251,6 g, joten tuhkapitoisuus on 5,8 %. Tuhkapitoisuus oli huomattavan korkea, korkein testatuista pelleteistä.



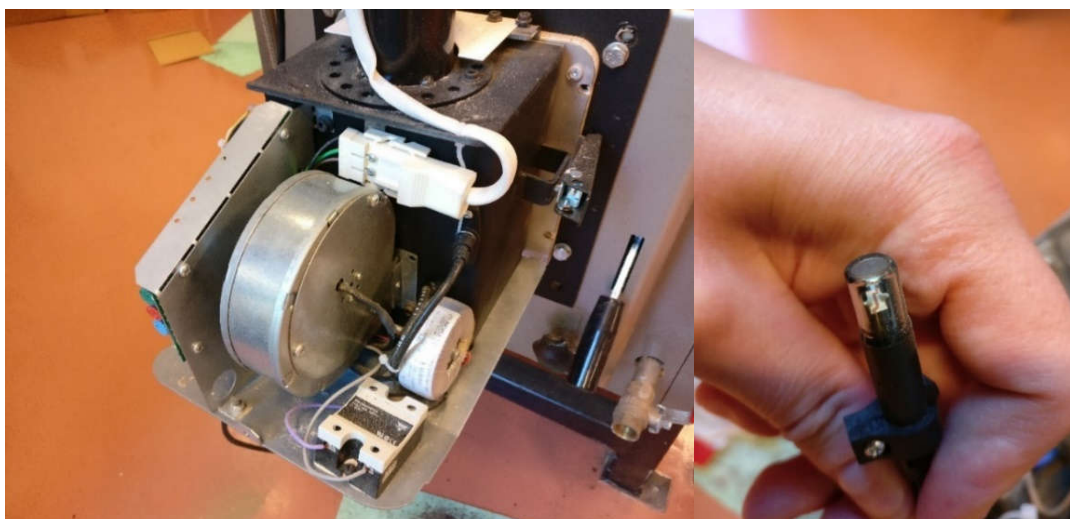
Kuva 29. 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta sisältävää seospellettiä

Polttimen termostaatti oli kytketty lämpötilaan 75 °C. Kattilan lämpömittari näytti 40 °C, poivirtaava vesi oli 35 °C ja sisääntuleva vesi 39 °C. Lopetettaessa samat lämmöt olivat 59 °C, 46 °C ja 46 °C. Paine oli aloitettaessa 0,9 bar ja lopussa 1 bar. Koepoltot alkoivat epäonnistuneella käynnistysyrityksellä. Pelletit kyllä paloivat, mutta happi ei vaikuttanut riittävän. Laite puhdistettiin parin käynnistysyrityksen jälkeen ja selvisi, että syöttöputken suulle oli jumiutunut yksi pelletti. Tukosta ei ollut vielä syntynyt, mutta mahdollisuus sellaisen syntymiselle oli olemassa. Syttyessään pelletit paloivat hyvin (kuva 30) ja voimakkaasti, mutta vaikutti, että polttimen automatiikka sammutti palamisen lopettamalla puhaltamisen.



Kuva 30. 50 % SRF / 50 % kierrätyspuu -pelletti palaa voimakkaasti ja kipinöiden

Energon Oy:n Leif Ekholmin (2018a) mukaan mahdollinen syy sammumiselle oli, että polttimen sisällä oleva valovastus oli likainen tai epäkunnossa. Valovastuksen tehtävä on tarkastella polttotapahtuman laatua polton aikana ja sen mukaan automatiikka säätelee polttotapahtumaa. Kuvassa 31 on polttimen suojakupu poistettu ja rakenne on esillä. Valovastus sijaitsee oikeanpuolimmaisien kiekkojen yläpuolella. Kuvassa 31 oikealla näkyy valovastus, joka oli puhdas ja ehjä, joten käyntihäiriöt eivät johtuneet sen likaisuudesta tai toimintaviasta.



Kuva 31. Vasemmalla poltin ilman kantaa valovastuksen tarkastusta varten ja oikealla lähikuva valovastuksesta

Polttokokeet jatkuivat epävakaasti, vaikka poltin puhdistettiin ja tarkistettiin vauriot sammumisten yhteydessä. Palaminen ei jatkunut hyvänlaatuisena kuin enintään 20-30 minuuttia, kunnes tuli taas häiriö. Polttokokeet lopetettiin, koska epäilyksenä oli, että polttimessa oli jokin vika. Kuvassa 32 näkyy palotila polttokokeiden jälkeen ja tuhka-astia. Tuhkan seassa oli huonosti palanutta materiaalia, joka vaikutti tuhkapitoisuuteen. Sintraantunutta tuhkaa ei kuitenkaan ollut havaittavaa määrää. Tuhka-astian takaseinään oli lentänyt sulanutta muovia. Polttoaineeksi vaihdettiin normaali puupelletti ja kokeiltiin, toimiko poltin normaalisti. Normaaleilla pelleteillä tuli yksi käynnistyshäiriö, mutta sen jälkeen pelletit paloivat moitteetta 45 minuuttia, jonka jälkeen poltto lopetettiin. Poltin ei siis ollut rikki.



Kuva 32. Vasemmalla palotila polttamisen jälkeen ja oikealla lähikuva tuhka-astiasta

5 POLTTOKOKEIDEN MITTAUKSET JA POLTTOA KOSKEVAT RAJOITTEET

5.1 Standardit ja lainsäädäntö

Seospelletöintiä ja sen polttamista rajoittavat lainsäädäntö, standardit ja voimaloiden päästörajat. Lain osalta Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi jätteistä 2008/98 asettaa suuntaviivoja hankkeelle ja seospelletin kannalta sen kuudes artikla antaa mahdollisuuden kaupallistamiselle. Kuudes artikla kertoo jätteeksi luokittelun päättymisestä:

Tietyt jätteet lakkaavat olemasta 3 artiklan 1 kohdassa tarkoitettua jätettä, kun ne ovat läpikäyneet hyödyntämistoimen, kierrätys mukaan luettuna, ja ovat seuraavien edellytysten mukaisesti laadittujen arviointiperusteiden mukaiset:

a) ainetta tai esinettä käytetään yleisesti tiettyihin tarkoituksiin;

b) aineelle tai esineelle on olemassa markkinat tai kysyntää;

c) aine tai esine täyttää tiettyjen tarkoitusten mukaiset tekniset vaatimukset ja on tuotteisiin sovellettavien olemassa olevien säännösten ja standardien mukainen; ja

d) aineen tai esineen käytöstä ei aiheudu haitallisia kokonaisvaikutuksia ympäristölle eikä ihmisten terveydelle. Näihin perusteisiin sisältyy tarvittaessa epäpuhtauksien raja-arvoja, ja niissä otetaan huomioon aineen tai esineen mahdolliset haitalliset vaikutukset ympäristölle. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi jätteistä 2008/98, 6 §.)

Nykyisellään seospelletit luokitellaan jätteiksi, joten niitä ohjaava valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 151/2013 liittyy myös seospelletteihin, koska sen liitteestä kaksi löytyy jätteenpolttolaitoksen ilmaan johdettavien päästöjen raja-arvot. Taulukoissa 7-9 on nämä kolme eri raja-arvoa: vuorokausikeskiarvot, puolen tunnin keskiarvot ja vähintään 30 minuutin ja enintään kahdeksan tunnin kuluessa mitatut keskiarvot.

Taulukko 7. Vuorokausikeskiarvot (Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 151/2013, 12)

Epäpuhtaus	Raja-arvo, mg/m ³ (n)
Hiukkasten kokonaismäärä	10
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC)	10
Suolahappo (HCl)	10
Fluorivety (HF)	1
Rikkidioksidi (SO ₂)	50
Typ pim on oksidi (NO) ja typpidioksidi (NO ₂) typpidioksidina; koskee käytössä olevia jätteenpolttolaitoksia, joiden nimelliskapasiteetti on yli 6 tonnia/tunti, sekä uusia jätteenpolttolaitoksia	200
Typ pim on oksidi (NO) ja typpidioksidi (NO ₂) typpidioksidina; koskee käytössä olevia jätteenpolttolaitoksia, joiden nimelliskapasiteetti on enintään 6 tonnia/tunti	400

Taulukko 8. Puolen tunnin keskiarvot (Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 151/2013, 12)

Epäpuhtaus	Raja-arvo, mg/m ³ (n)	
	(100%) A	(97%) B
Hiukkasten kokonaismäärä	30	10
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC)	20	10
Suolahappo (HCl)	60	10
Fluorivety (HF)	4	2
Rikkidioksidi (SO ₂)	200	50
Typ pim on oksidi (NO) ja typpidioksidi (NO ₂) typpidioksidina; koskee käytössä olevia jätteenpolttolaitoksia, joiden nimelliskapasiteetti on yli 6 tonnia/tunti, sekä uusia jätteenpolttolaitoksia	400	200

Taulukko 9. Vähintään 30 minuutin ja enintään kahdeksan tunnin näytteenottoajan kuluessa mitatut kaikki keskiarvot (Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 151/2013, 13)

Epäpuhtaus	Raja-arvo, mg/m ³ (n)
Kadmium ja sen yhdisteet kadmiumina (Cd)	yhteensä
Tallium ja sen yhdisteet talliumina (Tl)	0,05
Elohopea ja sen yhdisteet elohopeana (Hg)	0,05
Antimoni ja sen yhdisteet antimonina (Sb)	yhteensä 0,5
Arseeni ja sen yhdisteet arseenina (As)	
Lyijy ja sen yhdisteet lyijynä (Pb)	
Kromi ja sen yhdisteet kromina (Cr)	
Koboltti ja sen yhdisteet kobolttina (Co)	
Kupari ja sen yhdisteet kuparina (Cu)	
Mangaani ja sen yhdisteet mangaanina (Mn)	
Nikkeli ja sen yhdisteet nikkelinä (Ni)	
Vanadiini ja sen yhdisteet vanadiinina (V)	

Lisäksi hiilimonoksidi (CO), eli häkäpitoisuudet, eivät saa ylittää seuraavia rajoja:

- 50 mg/m³ savukaasua vuorokausikeskiarvona
- 100 mg/m³ savukaasua kaikissa puolen tunnin keskiarvoina määritetyissä mittauksissa
- 150 mg/m³ savukaasua vähintään 95 prosentissa kaikista kymmenen minuutin keskiarvoina määritetyistä mittauksista (Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 151/2013, 13).

Taulukossa 10 on Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tiettyjen keskisuurista polttolaitoksista ilmaan joutuvien epäpuhtauspäästöjen rajoittamisesta 2015/2193 annetut raja-arvot keskisuurille voimalaitoksille. Taulukossa on jaettu erikseen kiinteät biomassat ja muut kiinteät polttoaineet, joita seospelletit ovat.

Taulukko 10. Voimalaitoksia koskevat raja-arvot (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tiettyjen keskisuurista polttolaitoksista ilmaan joutuvien epäpuhtauspäästöjen rajoittamisesta 2015/2193)

1-5 MW keskisuuria voimalaitoksia koskevat raja-arvot		
Epäpuhtaus	Kiinteä biomassa	Muut kiinteät polttoaineet
SO ₂	200	1100
NO _x	650	650
Hiukkaset	50	50
Yli 5 MW keskisuuria voimalaitoksia koskevat raja-arvot		
SO ₂	200	400
NO _x	650	650
Hiukkaset	30	30
Uusia keskisuuria polttolaitoksia koskevat raja-arvot		
SO ₂	200	400
NO _x	300	300
Hiukkaset	20	20

Pellettien laatukriteeristö ja luokat löytyvät SFS-standardeista SFS-EN ISO 17225 ja SFS-EN ISO 15359. Jälkimmäisestä standardista löytyy kiinteiden kierrätyspolttoaineiden vaatimukset ja luokat, jotka koskevat tätä hanketta enemmän. Ensimmäinen standardi on kiinteille biopolttoaineille polttoaineen laatuvaatimukset ja -luokat. Verrokipelletti Verso

Hotti on valmistettu kyseistä standardia noudattaen (taulukko 11). SGS Finland Oy:n analyyseja puumurskeen ominaisuuksista ja analyysia puupelleteistä verrattaessa taulukkoon 11, suurin osa arvoista pysyy rajojen sisäpuolella tai on lähellä rajaa.

Taulukko 11. Teollisuuskäyttöön tarkoitettujen luokiteltujen puupellettien laatuvaatimukset (SFS-EN ISO 17225-2 2011, 20)

	Ominaisuusluokka, Analyysimenetelmä	Yksikkö	I1	I2	I3
Veloitettava	Alkuperä ja lähde, ISO 17225-1		1.1 Metsän, istutusmetsän puu tai muu luonnonpuu 1.2.1 Kemiallisesti käsittelemätön puutähde ^{a)}	1.1 Luonnon- ja istutusmetsän puu tai muu luonnonpuu 1.2.1 Kemiallisesti käsittelemätön puutähde ^{a)}	1.1 Luonnon- ja istutusmetsän puu tai muu luonnonpuu 1.2.1 Kemiallisesti käsittelemätön puutähde 1.3.1 Kemiallisesti käsittelemätön käytöstä poistettu puu tai puutuote
	Halkaisija, D^{b)} ja Pituus L^{c)}, ISO 17829 Kuvan 1 mukaan	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D10, 10 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D10, 10 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D12, 12 ± 1; 3,15 < L ≤ 40
	Kosteus, M, ISO 18134-1, ISO 18134-2	p-% saapumistilassa, märkäpainosta	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Tuhka, A, ISO 18122	p-% kuiva	A1.0 ≤ 1,0	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Mekaaninen kestävyys, DU, ISO 17831-1	p-% saapumistilassa	97,5 ≤ DU ≤ 99,0	97,0 ≤ DU ≤ 99,0	96,5 ≤ DU ≤ 99,0
	Hienoaines, F^{d)}, ISO 18846	p-% saapumistilassa	F4.0 ≤ 4,0	F5.0 ≤ 5,0	F6.0 ≤ 6,0
	Lisäaineet^{e)}	p-% saapumistilassa	< 3 Tyyppi ja määrä ilmoitettava	< 3 Tyyppi ja määrä ilmoitettava	< 3 Tyyppi ja määrä ilmoitettava
	Tehollinen lämpöarvo, Q, ISO 18125	MJ/kg saapumistilassa	Q16.5 ≥ 16,5	Q16.5 ≥ 16,5	Q16.5 ≥ 16,5
	Irtotiheys, BD^{f)}, ISO 17828	kg/m ³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Tyyppi, N, ISO 16948	p-% kuiva	N0.3 ≤ 0,3	N0.3 ≤ 0,3	N0.6 ≤ 0,6
	Hajotettujen pellettien palakokojakauma, ISO 17830	p-% kuiva	≥ 99 % (< 3,15 mm) ≥ 95 % (< 2,0 mm) ≥ 60 % (< 1,0 mm)	≥ 98 % (< 3,15 mm) ≥ 90 % (< 2,0 mm) ≥ 50 % (< 1,0 mm)	≥ 97 % (< 3,15 mm) ≥ 85 % (< 2,0 mm) ≥ 40 % (< 1,0 mm)
	Rikki, S, ISO 16994	p-% kuiva	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05
	Kloori, Cl, ISO 16994	p-% kuiva	Cl0.03 ≤ 0,03	Cl0.05 ≤ 0,05	Cl0.1 ≤ 0,1
	Arseeni, As, ISO 16968	mg/kg kuiva	≤ 2	≤ 2	≤ 2
	Kadmium, Cd, ISO 16968	mg/kg kuiva	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
	Kromi, Cr, ISO 16968	mg/kg kuiva	≤ 15	≤ 15	≤ 15
	Kupari, Cu, ISO 16968	mg/kg kuiva	≤ 20	≤ 20	≤ 20
	Lyijy, Pb, ISO 16968	mg/kg kuiva	≤ 20	≤ 20	≤ 20
	Elohopea, Hg, ISO 16968	mg/kg kuiva	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Sinkki, Zn, ISO 16968	mg/kg kuiva	≤ 200	≤ 200	≤ 200
Opastava	Tuhkan sulamiskäyttäminen^{g)}, CEN/TS 15370-1 [4]	°C	Suosittelaa ilmoitettavan	Suosittelaa ilmoitettavan	Suosittelaa ilmoitettavan
a)	Mitättömät määrät liimaa, rasvaa tai muuta sahatuotannon lisäaineita, joita käytetään sahoilla sahatavaran tai sahatuotteiden valmistuksessa luonnon puusta, sallitaan, mikäli pellettien kaikki kemialliset ominaisuudet pysyvät raja-arvoissa ja/tai pitoisuudet ovat liian pieniä huomioitavaksi.				
b)	Valittu pellettien halkaisija D06, D08, D10 tai D12 ilmoitettava.				
c)	Pellettejä, joiden pituus on yli 40 mm voi olla 1 p-%. Maksimipituuden on oltava < 45 mm. Pelletit ovat pidempiä kuin 3,15 mm, jos ne jäävät pyöreäaukkoisen 3,15 mm:n seuralle. Pelletit, joiden pituus on alle 10 mm, p-% suositellaan ilmoitettavan.				
d)	Hienoaines irtotoimituksena tehtaan portilla (lastauksessa) ja suursäkeissä (pakattaessa tai toimitettaessa loppukäyttäjälle).				
e)	Lisäaineen tyyppi, jota käytetään tuotannon, toimituksen tai polton tehostamiseksi (esim. sideaineet, kuonaantumisen estoaineet tai joku muu lisäaine kuten tärkkelys, maissijauho, perunajauho, kasviöljy, ligniini).				
f)	Suurin arvo irtotiheydelle on 750 kg/m ³ .				
g)	Suositellaan, että kaikki lämpötilat (kutustumislämpötila (SST), muodonmuutoslämpötila (DT), puolipalloilämpötila (HT) ja sulalämpötila (FT) hapettavissa olosuhteissa ilmoitettaisiin.				

SFS-EN ISO 15359 on pääasiallinen kriteeristön lähde tälle projektille ja kertoo kiinteiden kierrätyspolttoaineiden vaatimukset ja luokat. Luokittelu perustuu kolmeen kriteeriin: teholliseen lämpöarvoon, klooripitoisuuteen ja elohopeapitoisuuteen. Tehollisen lämpöarvon ja klooripitoisuuden osalta seospelletit voivat olla viisiluokkaisella asteikolla paremmassa päässä, jopa toisessa luokassa, mutta elohopeapitoisuus todennäköisesti olisi huonommalla asteikolla. Tarkka määrittäminen vaatii useita näytteitä ja tarkempaa tutkimusta, sitä paitsi luokitus itsessään ei ole kaupalliseen tarkoitukseen riittävä, vaan polttoaineesta tulee olla tarkempi kuvaus.

5.2 Polttokokeiden valmistelut

Valmistelut aloitettiin tutkimussuunnitelman tekemisellä ja taustatutkimuksella, koska kokeen suorittajalla ei ollut aiempaa kokemusta pelletöinnistä tai pelletinpoltosta. Ensimmäinen päätettiin seosten määrä, joita oli ensimmäisillä suunnitteilla jopa kymmenen, mutta lopulta vain kolme toteutettiin. Pelleteistä päätettiin mitata kosteus, tuhkapitoisuus, savukaasut, energiasisältö ja mekaaninen kestävyys.

Alun perin pelletöintilaitteiston piti tulla Saksasta Amandus Kahla Lahteen, mutta hanke viivästyi niin paljon, että PHJ etsi muita mahdollisuuksia kokeen suorittamiseksi. Joensuusta löytyi Konepaja M. Pappinen Oy, jolla on vankka kokemus pelletöinnistä ja pellettikoneista. Heiltä löytyy myös tietotaitoa sidosaineista, joilla pellettien ominaisuudet saadaan kohdalleen, kun sopiva seossuhde löydetään.

Pelletöinnin ulkoistaminen ammattilaisille muutti opinnäytetyötä huomattavan paljon. Pelletöinti ja sen opettelu nollassa olisi ollut niin valtava urakka, että jälkepäin tarkasteltuna tämä oli parempi ratkaisu. Päätimme keskittyä vain pelletteihin ja niiden ominaisuuksiin. Koepoltot päätettiin toteuttaa Lahden Energon Oy:n pienessä polttolaboratoriossa. Siellä pystyi mittaamaan kaiken muun, paitsi mekaanisen kestävyuden ja energiasisällön.

Karelia-ammattikorkeakoulu teki erilliset savukaasuanalyysit, joista saatiin lisää aineistoa ja vertailutulokset. Karelia-ammattikorkeakoulu suoritti mekaanisen kestävyuden mittauksen, joten meidän ei sitä tarvinnut tehdä. Energon Oy:lla ei ollut mahdollisuutta mitata sitä, joten olisimme joutuneet etsimään toisen mittauspaikan. Lisäksi he tekivät hiukkanalyysin ja myös mittasivat kalorimetrin lämpöarvon. Näytteet lähetettiin myös Kotkaan SGS Finland Oy:n laboratorioon analyysia varten.

Pelletöintiin käytiin tutustumassa paikan päällä Joensuussa ja sieltä tuotiin mukana näytteet polttokokeita varten. Valitettavasti puujätepellettejä ei ollut vielä tarpeeksi paljon polttokokeita varten, joten niitä ei vielä tässä vaiheessa saatu mukaan. Seospelletit ja

vertailuksi otetut kaupan pelletit levitettiin polttinlaboratorion lattialle viikonlopuksi kuivumaan, jotta jokainen jae olisi kosteudeltaan samanlaista (kuva 33).

Kierrätyspuupelletit tulivat vasta myöhemmin ja niille ei suoritettu tätä samaa lattialle levittämistä. Kosteusmittauksista selviää, että kosteuspitoisuus oli siitä huolimatta samaa luokkaa. Kokeita varten oli myös hankittu ilmatiiviitä säiliöitä, joissa pellettejä säilytettiin, jotta kosteudet pysyisivät samana.



Kuva 33. Jakeet levitettiin Energon Oy:n pienen polttinlaboratorion lattialle pariksi päiväksi, jotta kosteus tasaantuisi tasaiseksi

5.3 Kosteuspitoisuus

Kosteuspitoisuus suoritettiin Lahden ammattikorkeakoulun laboratoriossa SFS-EN ISO 18134-2 mukaisesti. Standardissa määritellään oikeaoppinen menetelmä kiinteiden biopolttoaineiden kokonaiskosteuspitoisuuden mittaamiseen. Yksinkertaistetusti selitettynä sopiva näyte laitetaan oikeanlaisessa astiassa riittävän pitkäksi aikaa uuniin, jotta vakiomassa saavutetaan. Poistunut massa on kosteutta, joten kosteuspitoisuus voidaan sen perusteella määrittää. Kuvassa 34 pelletit standardin mukaisissa astioissa ja kuvassa 35 on Lahden ammattikorkeakoulun lämpökaappi, jossa kuivaus suoritettiin.



Kuva 34. 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta, 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta ja kaupallinen puupelletti menossa lämpökaappiin kuivumaan



Kuva 35. Kierrätyspuupelletin kosteuspitoisuus mitattiin muiden jälkeen

5.4 Tuhkapitoisuus

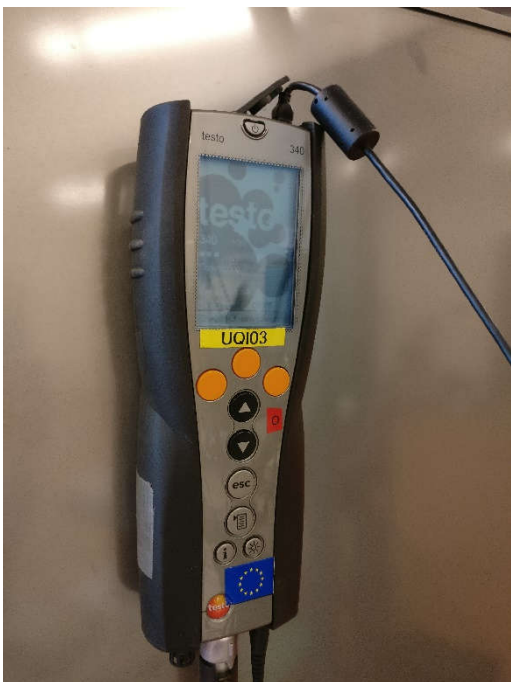
Tuhkapitoisuus mitattiin jokaisesta jakeesta Energon Oy:n tiloissa. Pellettsiiloon kaadettujen pellettien määrä mitattiin ja polton jälkeen siilossa ja syöttöputkessa olevien pellettien määrä vähennettiin lastattujen pellettien määrästä, jolloin saatiin selville poltettujen pellettien määrä. Polton jälkeen poltin siivottiin ja tuhkat kerättiin yhteen tuhka-astiaan, jonka paino mitattiin (kuva 36) ja tästä painosta vähennettiin tyhjän tuhka-astian paino, jolloin saatiin tuhkan paino. Tuhkan paino jaettiin poltetun pelletin määrällä, jolloin saatiin tuhkapitoisuus.



Kuva 36. Tuhka-astian painon mittaaminen

5.5 Savukaasuanalyysi

Savukaasuanalyysi suoritettiin Energon Oy:n Testo 340 -savukaasuanalyysaattorilla (kuva 37). Analyysaattorilla pystyy mittaamaan happi-, häkä- ja typen oksidi- pitoisuudet ja lisäksi palamisen hyötysuhteen, polttoaineen seoksen suhteen ja savukaasujen lämpötilan.



Kuva 37. Testo 340 -savukaasuanalyysaattori, jolla mittaukset suoritettiin

Kuvasta 38 näkyy, kuinka laite kiinnitettiin mittauksen ajaksi magneetilla kiinni polttimen kylkeen. Analyysaattorin anturi johdettiin polttimen savupiipun kyljessä olevasta reiästä sisälle, jolloin savukaasuja pystyttiin mittaamaan. Analyysaattoriin oli kytketty tietokone, joka keräsi jokaisesta jakeesta savukaasumittausten tulokset Excel-tiedostoon.



Kuva 38. Anturi kytkettynä savupiippuun

6 TULOKSET

6.1 Koepoltot

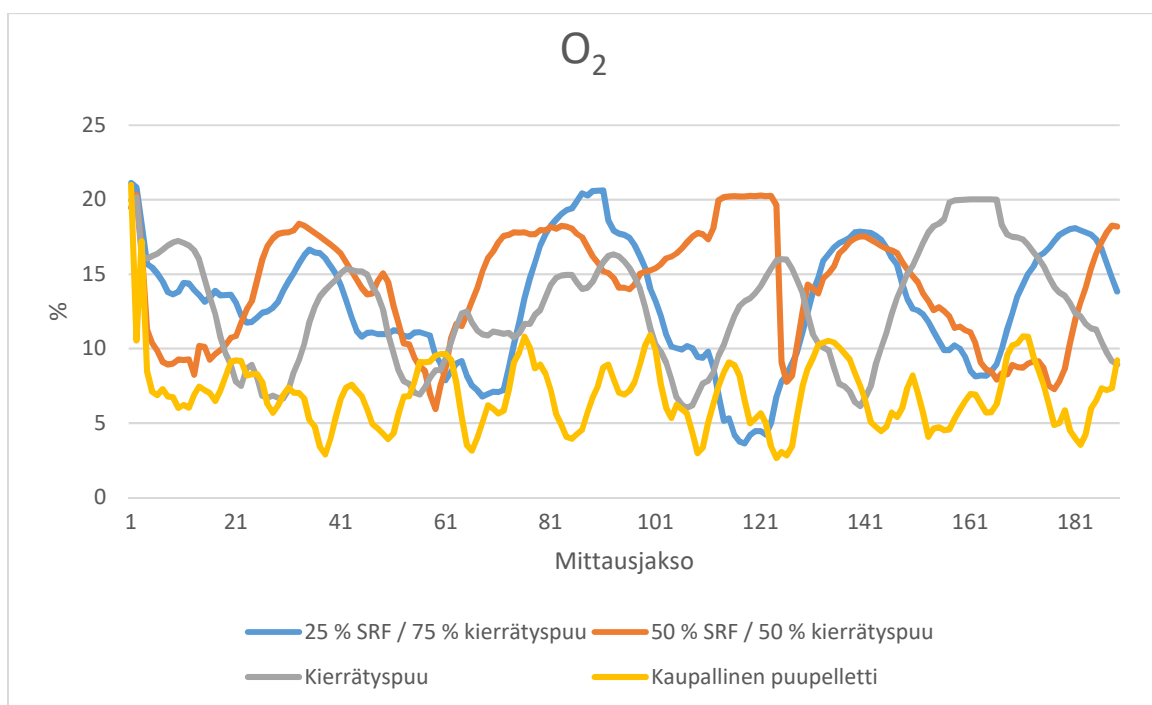
Energon Oy:n pienessä polttinlaboratoriossa suoritetuista polttokokeista saatiin tulokseksi savukaasumittaukset, kosteuspitoisuus ja tuhkapitoisuus. Taulukosta 12 nähdään seospolttoaineista mitatut pitoisuudet. Tuhkapitoisuuteen vaikuttivat seospolttoaineiden käyntihäiriöt, jotka aiheuttivat palamatonta materiaalia tuhkan sekaan. Myös kierrätyspuupelletti kärsi käyntihäiriöistä, mutta tuhkapitoisuus jäi pieneksi. Kierrätyspuupelletin tuhkasta viidesosa oli sintrausta.

Taulukko 12. Koepolttoaineiden kosteus- ja tuhkapitoisuus prosentteina

	Kosteuspitoisuus	Tuhkapitoisuus
50 % SRF / 50 % kierrätyspuu	5,5 %	5,8 %
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	6,3 %	3,7 %
Kierrätyspuupelletti	7 %	1,5 %
Kaupallinen pelletti	6,5 %	1,1 %

Kuviot 3-18 ovat Testo 340 -savukaasuanalysointilaitteella kerätystä datasta koottuja. Kaikki jaksot on mitattu samalla laitteistolla, samoissa olosuhteissa ja asetukset ovat olleet samat. Mittausjaksojen pituudet ovat myös samat. Savukaasuanalysointilaitteisto ilmoittaa tulokset ppm-yksikköä käyttäen, mutta mg/m^3 on useimmiten raja-arvoissa käytetty yksikkö, joten tulokset on taulukoissa annettu molemmissa yksiköissä. Kuvioiden vaakakselilla ei ole yksikköä, vaan se ilmoittaa mittausjaksot. Yksi mittausjakso on 10 sekuntia.

Kuvioissa 3 ja 4 esitetään polttoaineiden happi- ja häkämäärien käyriä. Kaupallisen pelletin savu- ja myös häkäkaasut pysyvät keskiarvoiltaan muita matalampina. Happipitoisuutta kuvaavassa kuviossa 3 kaupallisen pelletin käyrä käyttäytyy muita käyriä hillitymmin ja arvojen vaihteluväli ei ole niin suurta. Myös taulukosta 13 nähdään, että kaupallinen pelletti on palanut seospellettejä paremmin. Kaupallinen polttoaine palaa tasaisemmin ja seospellettien käyrät ovat huomattavasti rajumpia vaihtelultaan. Karelia-ammattikorkeakoulun Anssi Kokkonen (2018) totesi, että happi on karannut ohi ja liekki on ollut kokeiden aikana heikko.

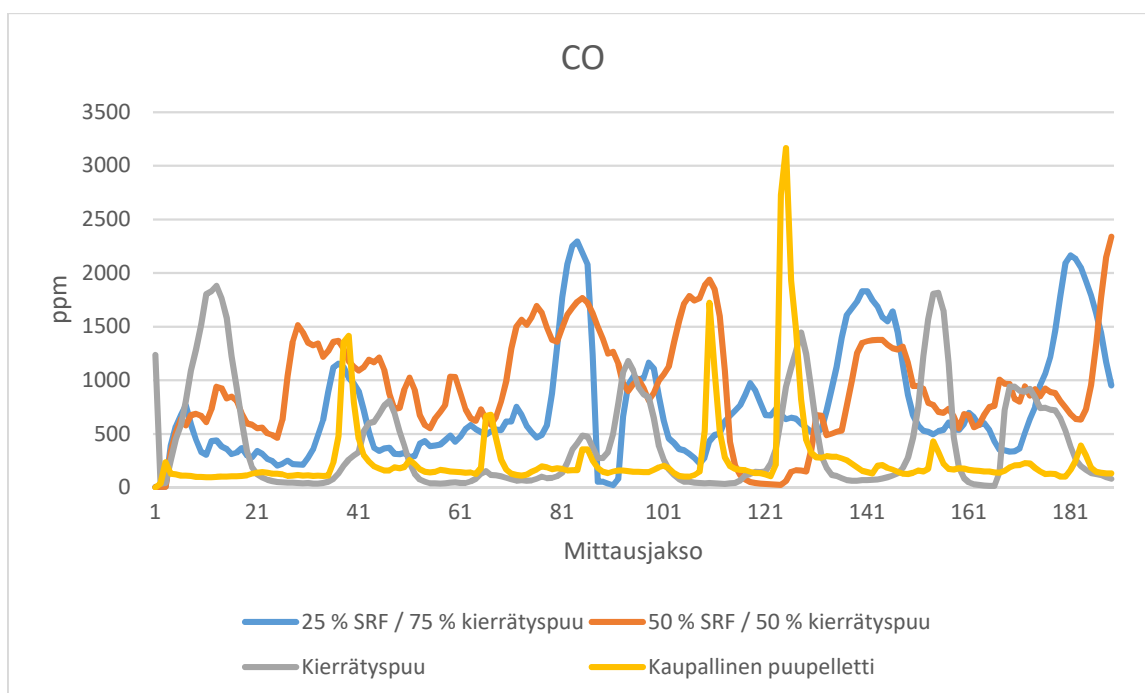


Kuvio 3. Savukaasujen happipitoisuus prosentteina

Taulukko 13. Savukaasujen happipitoisuuden keskiarvo, keskihajonta ja vaihteluväli

	Keskiarvo	Keskihajonta	Min	Max
50 % SRF / 50 % kierrätyspuu	14,2 %	3,8 %	5,94 %	20,33 %
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	13,0 %	4,1 %	3,63 %	21,13 %
Kierrätyspuupelletti	12,7 %	3,8 %	6,02 %	20,16 %
Kaupallinen pelletti	6,9 %	2,4 %	2,65 %	20,99 %

Kuviosta 4 ja taulukosta 14 näkee, ettei mikään polttoaine pysynyt minkään päästörajan sisäpuolella hiilimonoksidin (CO) eli häkäpitoisuuden osalta. Korkea häkäpitoisuus johtuu huonosta palamisen laadusta. Koelaitteisto ei soveltunut seospelleteille kovin hyvin, joten oikeanlaisella laitteistolla saataisiin paremmat tulokset. Esimerkiksi Karelia-ammattikorkeakoulun (2018) kokeissa 50 % SRF:ää sisältävä pelletti oli häkäarvoiltaan erinomaista, jopa parempaa kuin kaupallinen puupelletti.



Kuvio 4. Savukaasujen häkämäärä

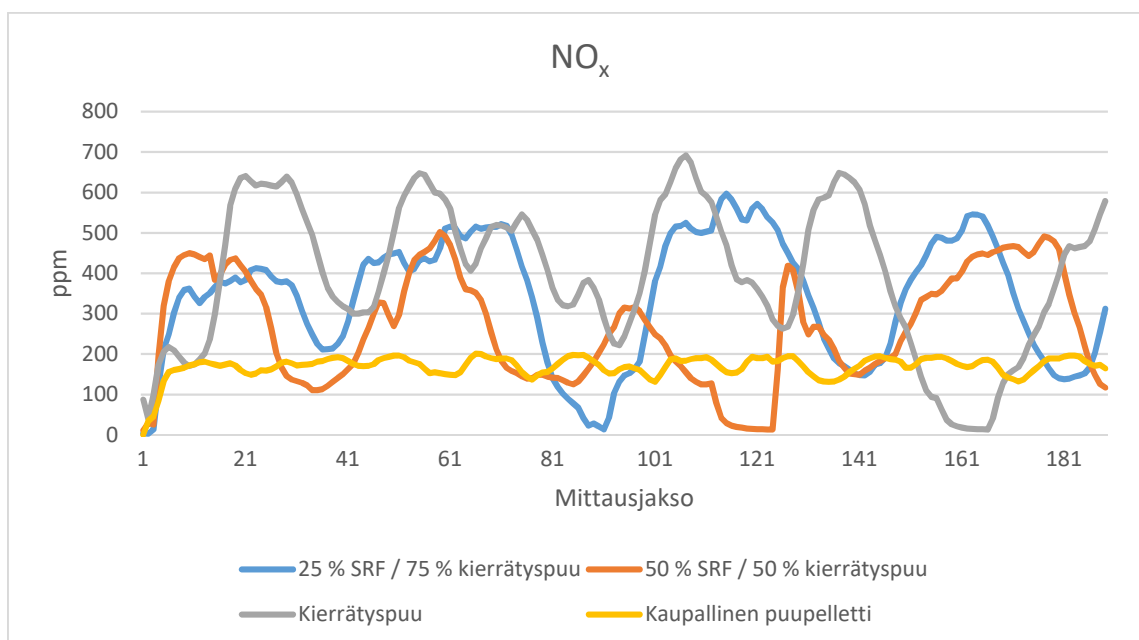
Taulukko 14. Savukaasujen häkäpitoisuuden keskiarvo, keskihajonta ja vaihteluväli

	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta	Min	Max
50 % SRF / 50 % Kierrätyspuu	938 ppm	1160 mg/m ³	475 ppm	3 ppm	2340 ppm
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	743 ppm	916 mg/m ³	528 ppm	3 ppm	2295 ppm
Kierrätyspuupelletti	409 ppm	504 mg/m ³	471 ppm	14 ppm	1881 ppm
Kaupallinen pelletti	260 ppm	321 mg/m ³	382 ppm	0 ppm	3167 ppm

Häkäpitoisuuden mittauskäyriä tarkasteltaessa mielenkiintoista on, että vaikka kaupallisen pelletin käyrä pysyy suurimman osan ajasta vakaana, on palamisessa ollut pari suurempaa piikkiä. Kuviota 4 tarkasteltaessa selviää, että kaupallisella pelletillä on todennäköisesti ollut kuitenkin jonkinlainen käyntihäiriö polttokokeen aikana, koska häkäpitoisuus nousee terävänä piikkinä. Kierrätyspuupelletin savukaasut sisältävät kuvaajan mukaan jatkuvasti kaupallista puupellettiä vähemmän häkää, mutta piikkien takia keskiarvo on silti korkeampi.

Häkäpitoisuus on tärkein palamisen puhtaudesta kertova tekijä, jonka vähentäminen laskee myös muita päästöjä (Ympäristöministeriö 2012, 33). Häkäpitoisuus on oleellisin säätösuure, jota tarkastellaan polttimen säätöjen tekemistä varten.

Seuravaksi tarkastellaan savukaasujen typen oksidien määriä. Kuviosta 5 ja taulukosta 15 nähdään typen oksidit (NO_x), jossa on siis yhteenlaskettuna typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO_2). Typpidioksidi on näistä kaasuista ympäristölle ja terveydelle vaarallisempi, kun taas typpimonoksidi on melko harmiton. Typpimonoksidi kuitenkin ilman kanssa reagoiessaan hapettuu typpidioksidiksi ja tästä syystä se täytyy huomioida.



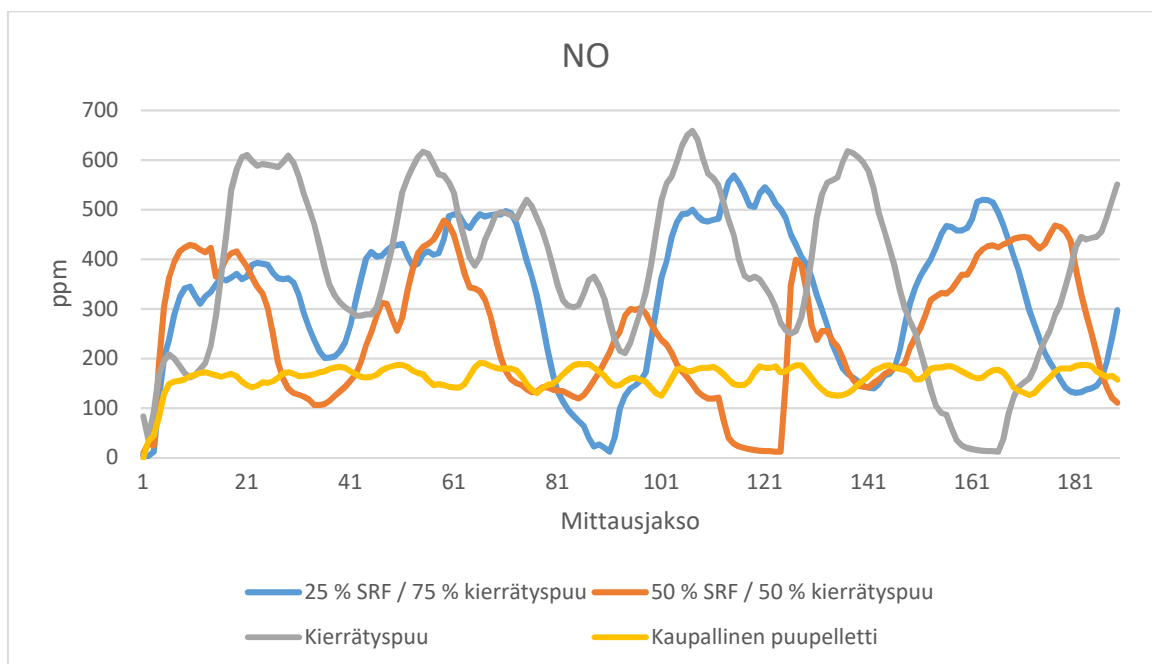
Kuvio 5. Savukaasujen typen oksidien (NO_x) määrä

Taulukko 15. Savukaasujen typen oksidien (NO_x) keskiarvo, keskihajonta ja vaihteluväli

	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta	Min	Max
50 % SRF / 50 % kierrätyspuu	266 ppm	539 mg/m ³	137 ppm	11 ppm	502 ppm
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	342 ppm	693 mg/m ³	154 ppm	3 ppm	597 ppm
Kierrätyspuupelletti	396 ppm	802 mg/m ³	182 ppm	13 ppm	692 ppm
Kaupallinen pelletti	170 ppm	344 mg/m ³	26 ppm	0 ppm	201 ppm

NO_x :lle on erilaisiin mittauksiin erilaisia raja-arvoja, mutta alin raja on 200 ppm, joka on noin 99 mg/m³. Karelia-ammattikorkeakoulu oli myös käyttänyt tätä rajaa raportissaan. Kaupallinen pelletti ainoana pysyy rajan alla, mutta 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta sisältävä seos ei ole kovin kaukana rajasta. Typen oksidien muodostumiseen vaikuttaa polttoaineen kosteus, typpipitoisuus, palamiskaasujen lämpötila ja happipitoisuuden jakaantuminen (Ympäristöministeriö 2012, 28).

Kuviossa 6 ja taulukossa 16 on savukaasujen typpimonoksidipäästöt (NO). Kierrätyspuupellettien typpimonoksidipäästöt ovat käyneet huomattavasti muita korkeammalla ja toisena tulee seospelletti, jossa on käytetty 75% kierrätyspuuta.

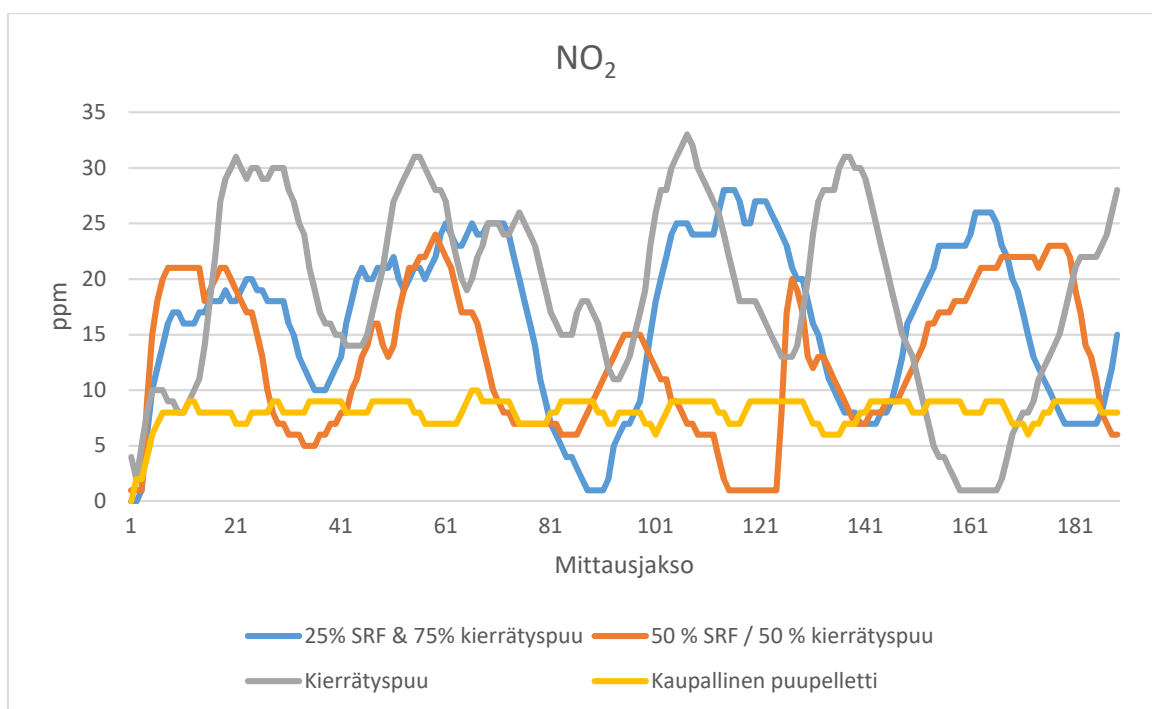


Kuvio 6. Savukaasujen typpimonoksidimäärä (NO)

Taulukko 16. Savukaasujen typpimonoksidin (NO) keskiarvo, keskihajonta ja vaihteluväli

	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta	Min	Max
50 % SRF / 50 % kierrätyspuu	253 ppm	334 mg/m ³	130 ppm	10 ppm	478 ppm
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	326 ppm	431 mg/m ³	147 ppm	3 ppm	569 ppm
Kierrätyspuupelletti	378 ppm	499 mg/m ³	173 ppm	12 ppm	659 ppm
Kaupallinen pelletti	162 ppm	214 mg/m ³	25 ppm	0 ppm	191 ppm

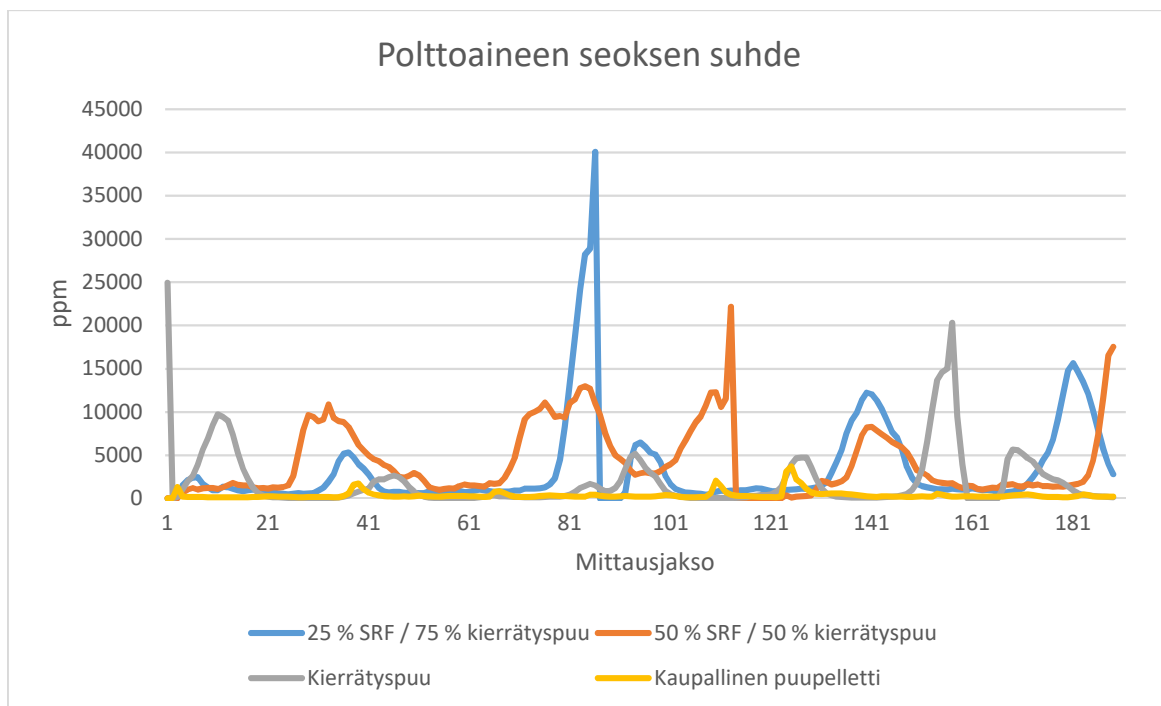
Kuviossa 7 ja taulukossa 17 on savukaasujen typpidioksidien (NO₂) määrä. Typpidioksidit on saatu vähentämällä typpimonoksidit (NO) typenoksidien (NO_x) määrästä. Kuvio 7 typpidioksidiesta näyttää lähes samalta kuin kuvio 6 typpimonoksidien määrästä.

Kuvio 7. Savukaasujen typpidioksidimäärä (NO₂)Taulukko 18. Savukaasujen typpidioksidin (NO₂) keskiarvo, keskihajonta ja vaihteluväli

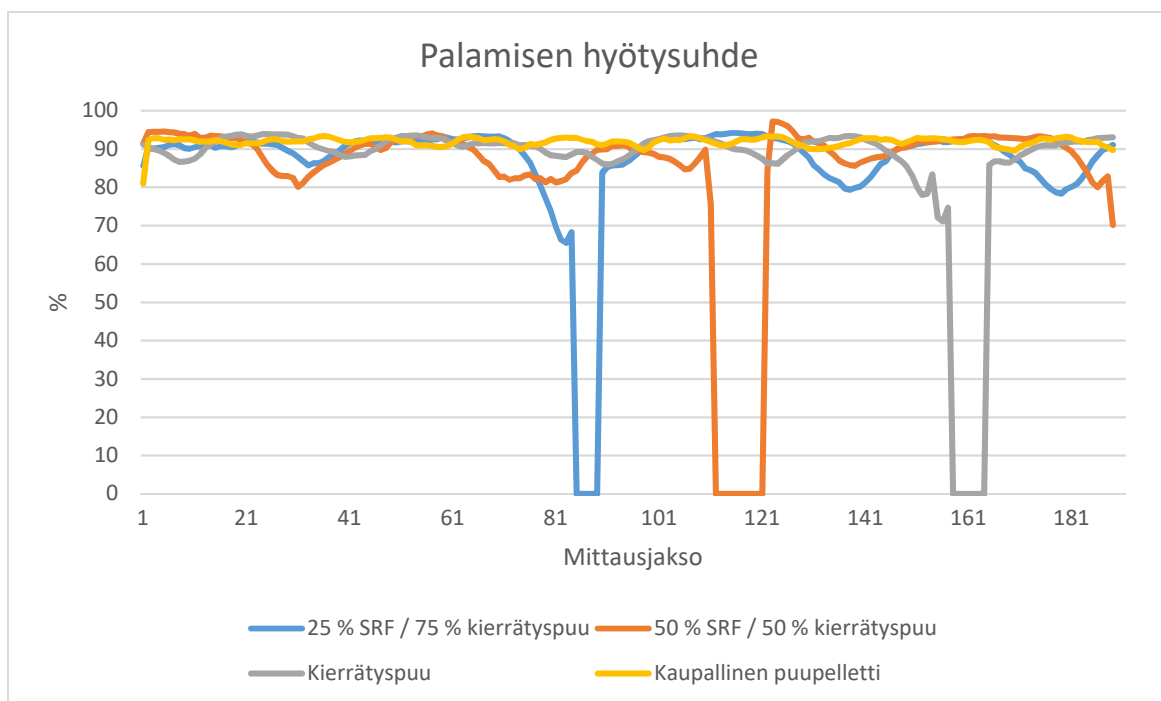
	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta	Min	Max
50 % SRF / 50 % kierrätyspuu	13 ppm	25 mg/m ³	6 ppm	1 ppm	28 ppm
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	16 ppm	31 mg/m ³	7 ppm	0 ppm	24 ppm
Kierrätyspuupelletti	19 ppm	37 mg/m ³	9 ppm	1 ppm	33 ppm
Kaupallinen pelletti	8 ppm	16 mg/m ³	1 ppm	0 ppm	10 ppm

Seuraavana tarkastellaan kuvioita 8-10, jotka kertovat lähinnä palamisen laadusta ja niiden perusteella voidaan tehdä tulkintoja polttokokeiden tulosten vertailtavuudesta. Jokainen polttoaine on mittauksen aikana sammunut tai vähintään palanut huonosti. Huono käyminen vaikuttaa päästöihin huonolla tavalla, joten NO_x- ja CO-arvot ovat hyvin palaessa aivan eri näköiset.

Kuvioita 8-10 vertailtaessa pystyy tulkitsemaan, että seospolttoaineet ovat palaneet hetkellisesti erinomaisesti ennen kuin häiriö tulee. Tämä voisi viitata myös siihen, että polttoaine palaa liian voimakkaasti, jolloin puupellettien polttamiseen säädetty poltin automaattisesti lopettaa polttamisen. Kuviossa 8 on pellettien energiasisällöstä ja polttimen toiminnasta riippuva hyötysuhde, joka on mitattu savukaasuanalysaattorilla. Hyötysuhde huononee, jos polttoaine palaa huonosti tai polttamisessa tapahtuu häiriö.

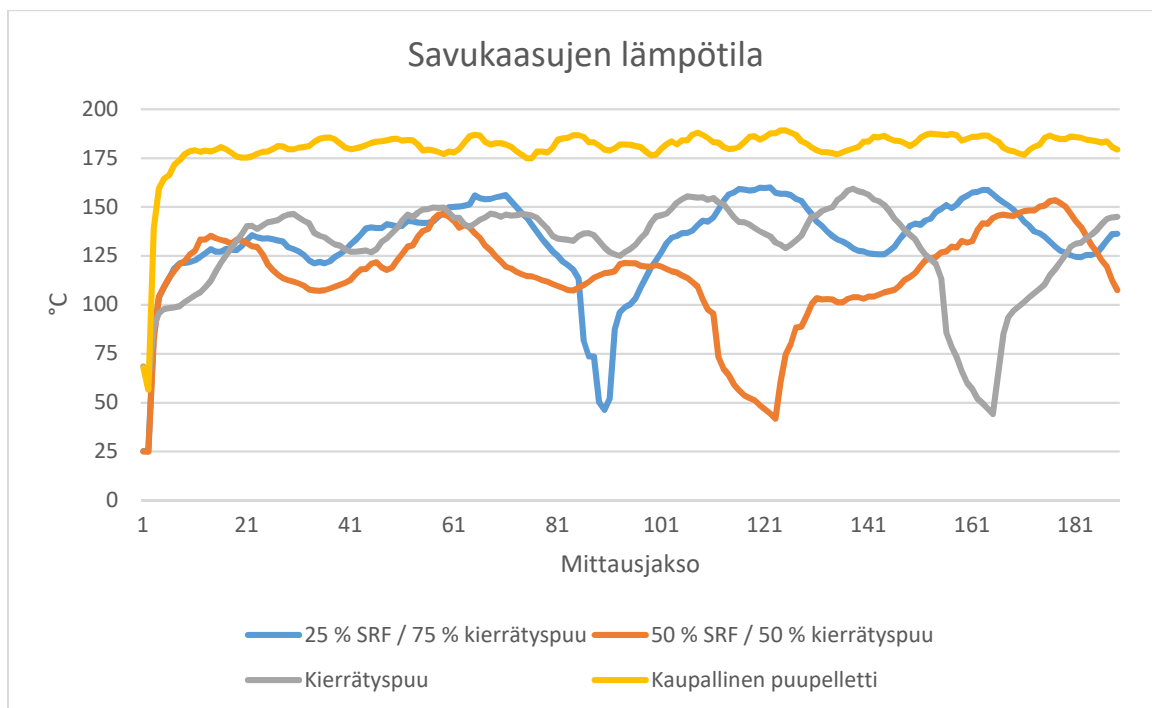


Kuvio 8. Savukaasujen polttoaineen seoksen suhde



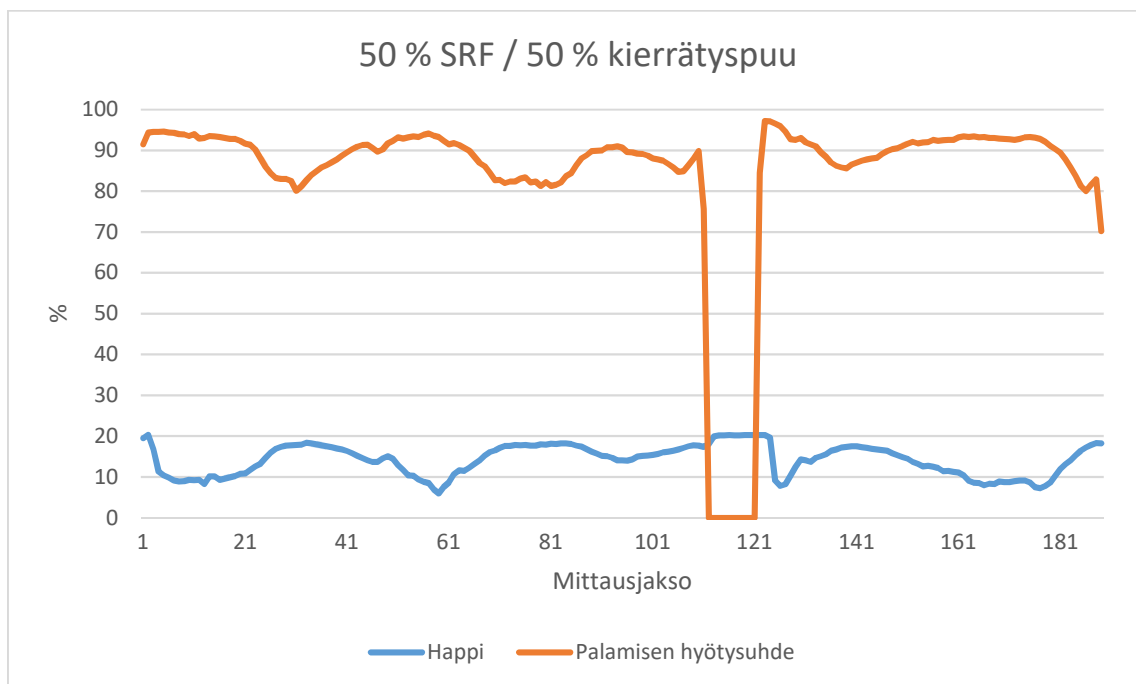
Kuvio 9. Palamisen hyötysuhde prosentteina

Kuviossa 10 on havainnollistettu savukaasujen lämpötilaa. Lämpötila on mitattu kattilan savupiipusta. Kuviossa 10 näkee selvästi, milloin poltin on sammunut ja kuinka hyvin kaupallinen puupelletti toimii koepolttimessa verrattuna seospelletteihin.

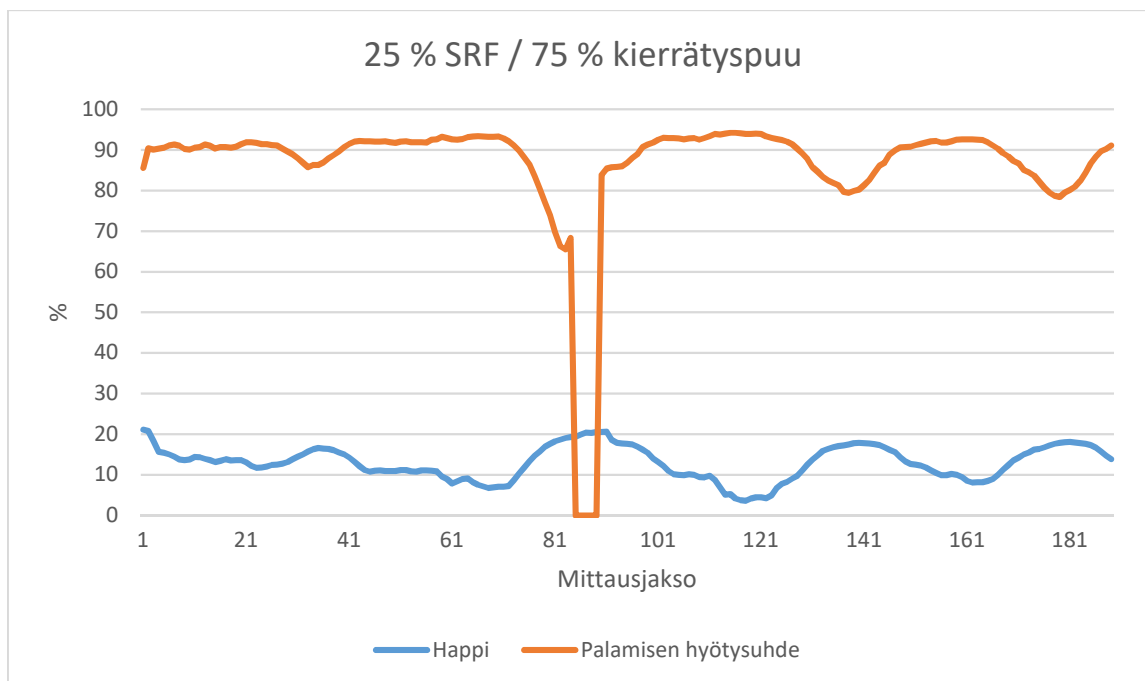


Kuvio 10. Savukaasujen lämpötila

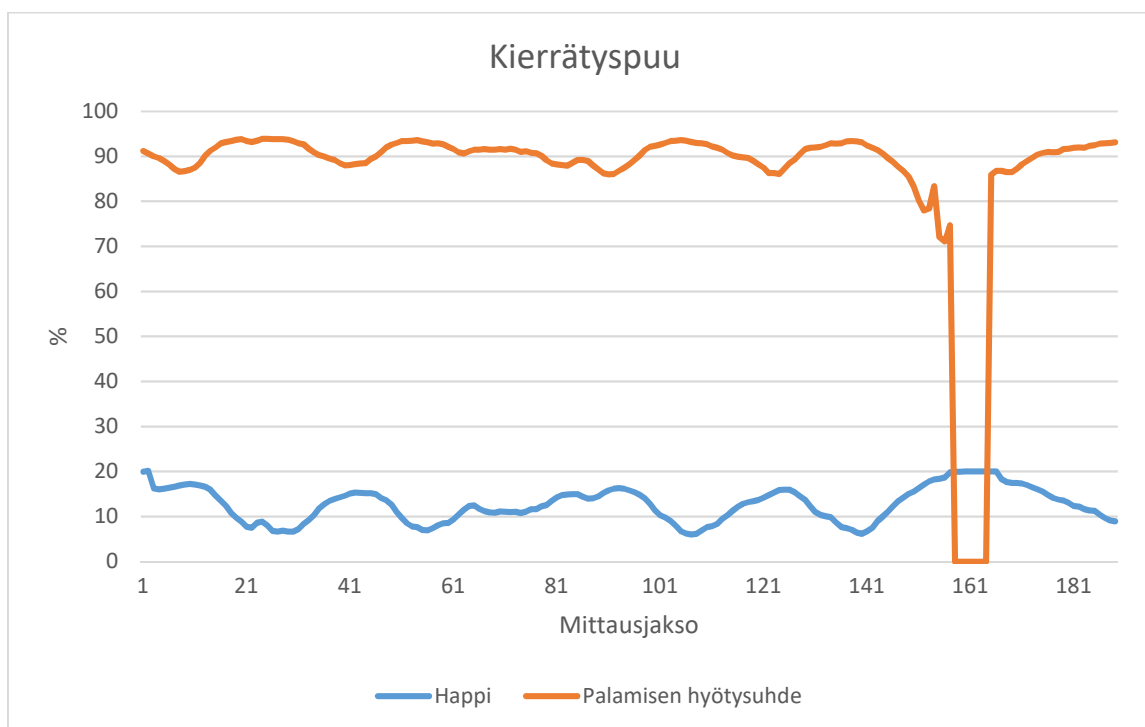
Seuraavissa kuvioissa 11-14 on eri polttoaineiden kuvaajat, joissa on hapen ja palamisen hyötysuhde havainnollistettu. Hyötysuhteeseen vaikuttaa eniten savukaasun lämpötila ja happipitoisuus (Ympäristöministeriö 2012, 34). Kuvaajien perusteella matala happipitoisuus vaikuttaa positiivisesti hyötysuhteeseen.



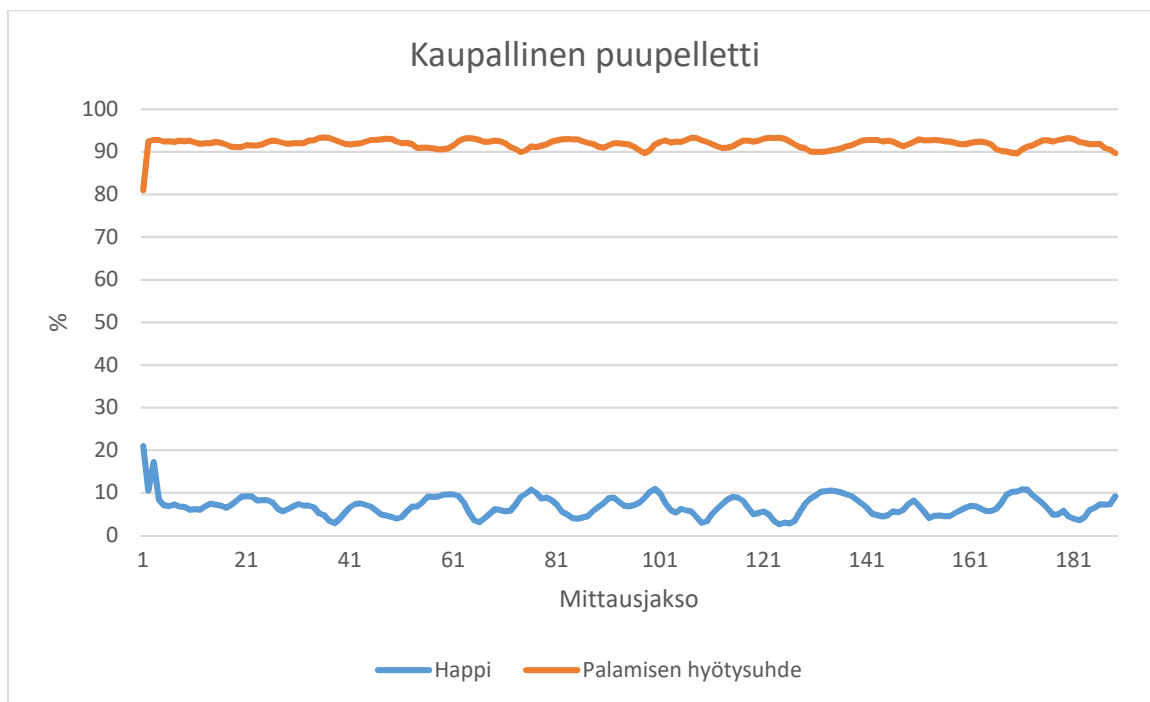
Kuvio 11. 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta sisältävän seoksen hapen ja palamisen hyötysuhteen kuvaaja



Kuvio 12. 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta sisältävän seoksen hapen ja palamisen hyötysuhteen kuvaaja

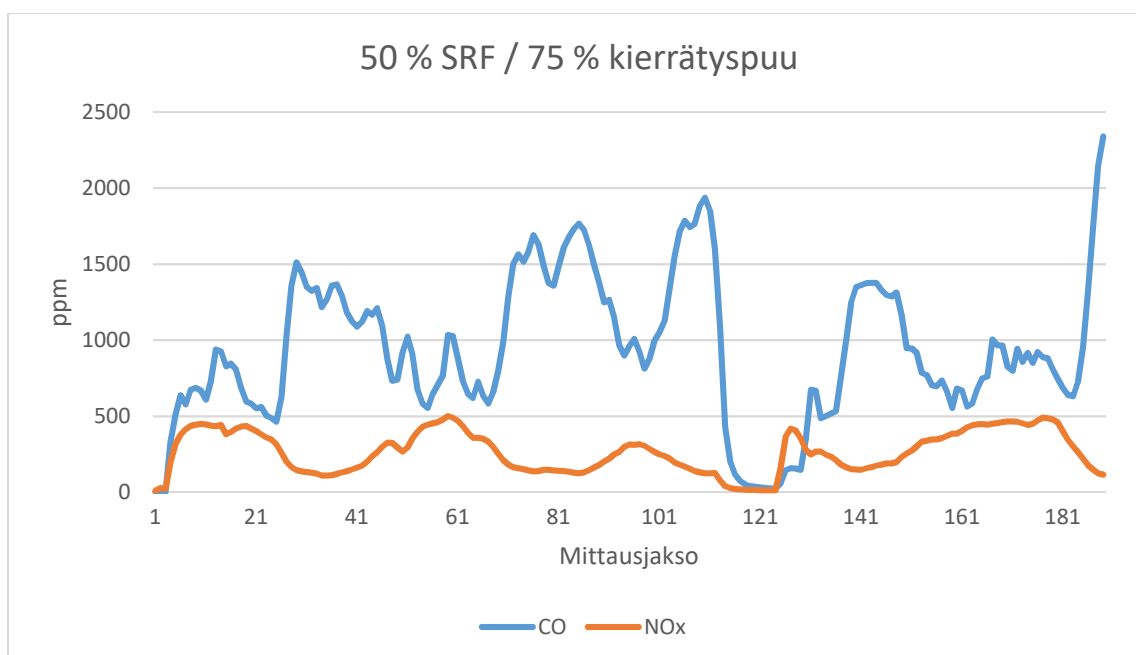


Kuvio 13. Kierrätyspuupelletin hapen ja palamisen hyötysuhteen kuvaaja

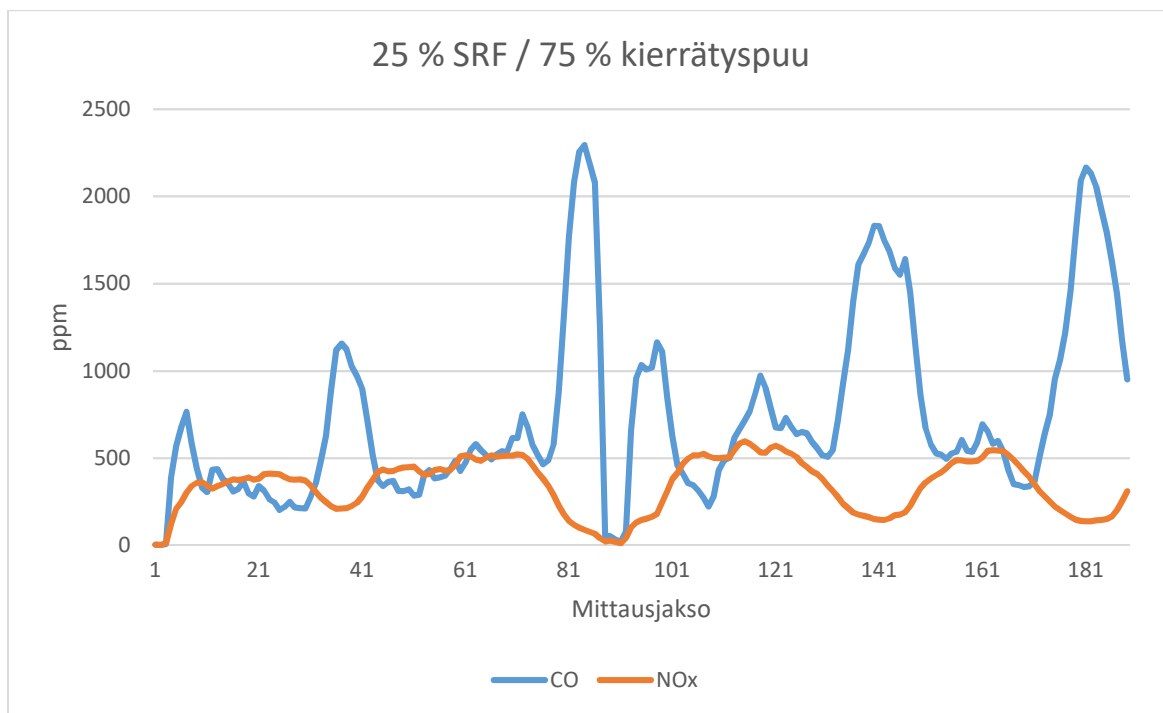


Kuvio 14. Kaupallisen puupelletin hapen ja palamisen hyötysuhteen kuvaaja

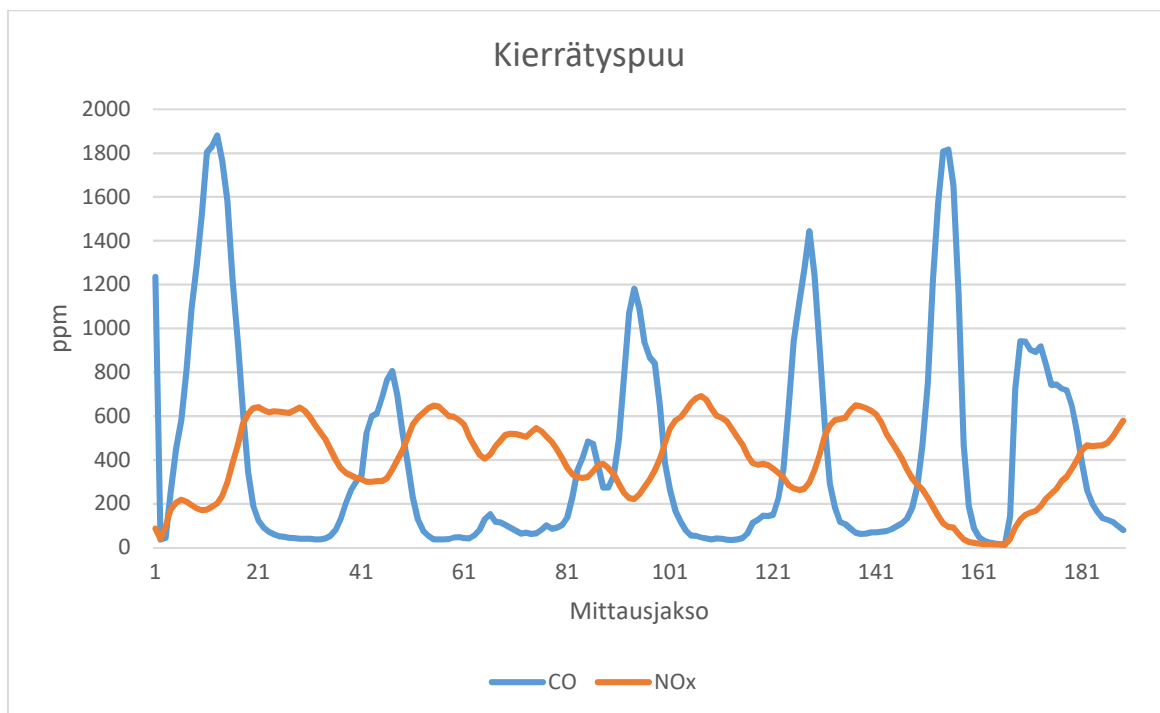
Kuvioista 11-14 huomaa, että hyötysuhde selvästi laskee, kun happipitoisuus nousee korkeammaksi. Kuvioissa 15-18 on havainnollistettu kaikkien kolmen polttoaineen häkä- ja typen oksidien pitoisuuksia. Kuvaajien perusteella häkäpitoisuuden määrä vaikuttaa typen oksidien määrään vähentävästi. Korkea häkäpitoisuus kertoo palamisen huonosta laadusta ja palamisen epäpuhtaudesta (Ympäristöministeriö 2012, 33).



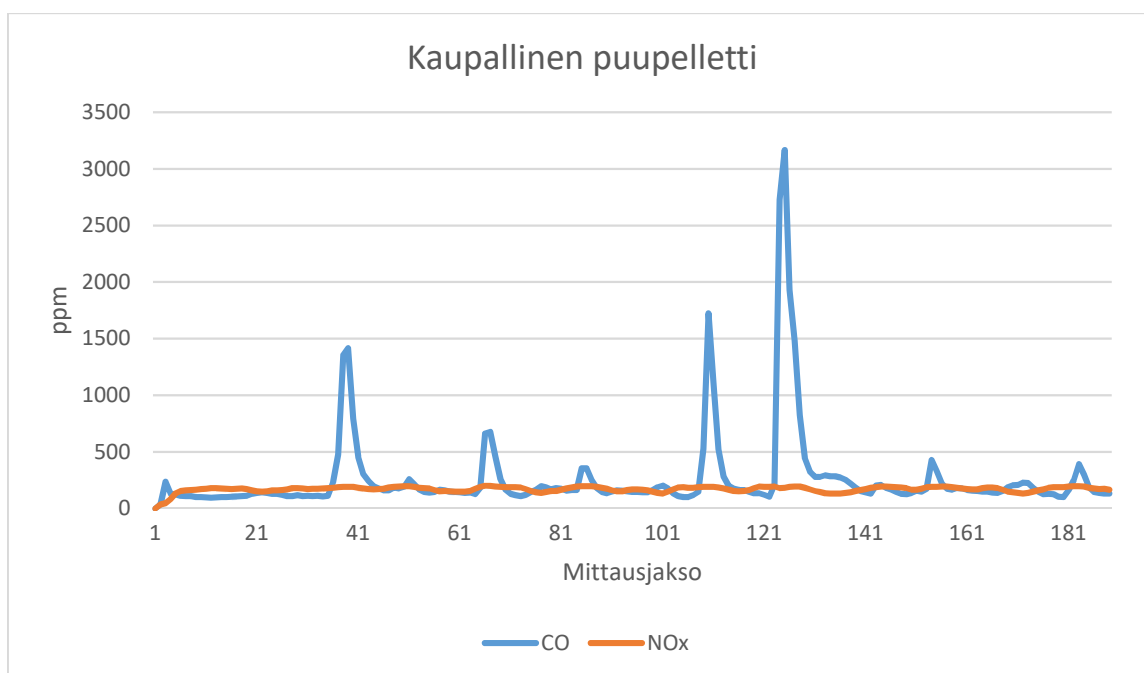
Kuvio 15. 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta sisältävän seoksen häkä- ja typen oksidien pitoisuus



Kuvio 16. 25 % SRF / 75 % kierrätyspuuta sisältävän seoksen häkä- ja typen oksidien pitoisuus



Kuvio 17. Kierrätyspuupelletin häkä- ja typen oksidien pitoisuus



Kuvio 18. Kaupallisen puupelletin häkä- ja typen oksidien pitoisuus

Polttokokeiden jälkeen Energon Oy:lle lähetettiin sähköpostilla selvityspyyntö siitä, miksi pellettikokeet menivät pieleen. Leif Ekholm vastasi, että pellettipoltin Bio Pro on tehty standardien mukaisten pellettien polttoa varten, mikä tarkoittaa sitä, että VTT:n määritelmän mukaan pellettien halkaisija on yleensä 8 mm ja pituus 10–30 mm. Pellettien kosteus on alhainen, 6–10 %. Myös tuhkapitoisuus on pieni eli noin 0,5 %. Irtokuutiometri pellettejä painaa 640–690 kg ja kiintotiheys on 1 100–1 500 kg/m³. Pellettikilon lämpöarvo on 14,0–17,5 MJ (4,7–5,0 kWh). (VTT 2016, 96.) Hän lisäsi myös, että kun tällaisia pellettejä poltetaan Energonin kattilassa ja polttimella, niin ongelmia ei synny. (Ekholm 2018b.)

Ekholm sanoi arvelleensa heti nähtyään jätetuusta tehdyt pelletit, että ongelmia voisi syntyä polttotapahtuman aikana. Pelletit olivat hänen havaintojensa mukaan hyvin kevyitä ja murenevia sekä sisälsivät mitä ilmeisemmin ainesosia, jotka eivät olleet puusta lähtöisin. Silmämääräisesti arvioiden hän huomasi myös, että palaminen oli hyvin epätasaista ja liekin väri vaihteli nopeasti palamisen aikana. Hänen mukaansa pelleteistä irronnut irtoaines sai todennäköisesti arinan tukkeutumaan, jonka lisäksi arinaan myös muodostui hyvin nopeasti sintraantunutta tuhkaa, mikä vielä aiheutti lisäongelmia. Ekholmin mukaan poltin pysähtyi todennäköisesti siksi, että arina tukkeutui ja sen seurauksena oli ali-ilmainen palaminen, mikä muutti liekin värin tumman punaiseksi, jolloin valokenno ei nähnyt riittävästi valoa, joten se aiheutti liekkihäiriön. (Ekholm 2018b.)

Karelia-ammattikorkeakoulun Anssi Kokkoselle lähetettiin myös sähköpostilla kysymys, kuinka heidän polttokokeensa oli mennyt, ja kysyttiin myös heidän arvionsa siitä,

minkälainen automatiikka voisi olla kyseessä. Kokkonen (2018) vastasi, että heidän polttokokeensa olivat menneet ilman erityisiä ongelmia ja että he käyttivät poltinta pienellä teholla ja heidän polttimensa pallopää oli pyörivä. Heidän kokeissaan käytettiin Konepaja M. Pappinen Oy:n poltinta (kuva 39).



Kuva 39. Konepaja M. Pappinen Oy:n pellettipoltin

Heidän kokeidensa aikana sintraantumista ei vielä ehtinyt ilmaantua, kuten meidän kokeessamme oli tapahtunut. Kokkosen (2018) mukaan sintraantumiseen vaikuttaa useampikin tekijä, esimerkiksi pistemäinen lämpötilan nousu palopäässä tai epäpuhtaudet polttoaineessa. Sintraantumista aiheuttavia epäpuhtauksia on esimerkiksi hiekka.

Kokkoselta kysyttiin myös pellettipolttimien automaatioista, jotka säätelevät palamista, ja hän vastasi, että poltinautomaatiot reagoivat muun muassa palotilan lämpötilaan, palokaasujen happipitoisuuteen, palontunnistukseen optisesti ja toisaalta myös erilaisten pinta-antureiden kautta polttoaineen syöttöön. Kokkonen myös kommentoi hänelle lähetettyjä kuvioita Energon Oy:lla suoritetuista koepoltoista, että näyttäisi, että happi on karannut ohi ja liekki on ollut kokeiden aikana heikko. (Kokkonen 2018.)

Edellisten kommenttien perusteella todennäköisin syy polttimen sammumiselle on ollut optinen palontunnistus. Anturi tarkistettiin koepoltojen aikana, ettei se ole likainen, mutta liekki on todennäköisesti ollut niin erilainen, että anturi on tulkinnut paloprosessin väärin.

6.2 Rinnakkaiskokeet

Karelia-ammattikorkeakoulu suoritti pellettien koepoltot, joissa tehtiin hiukkas- ja savukaasuanalyysi. Samalla suoritettiin myös kosteuden, mekaanisen kestävyuden ja lämpöarvon määritykset. Anssi Kokkosen (2018) sähköpostihaastattelun perusteella polttokokeet olivat sujuneet ilman ongelmia, eikä sintraantumista ilmennyt.

Testit suoritettiin neljälle eri polttoaineelle:

- Kaupallinen Vapon valmistama puupelletti
- I näyte, joka tehty kierrätyspuusta
- II näyte, joka sisältää 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta
- III näyte, joka on valmistettu 50 % SRF:ää / 50 % kierrätyspuuta.

Kuvassa 40 on Karelia-ammattikorkeakoulun PHJ:lle toimittamat näytteet pellettien tuhkista. Tuhkan väri, joka vaihtelee, on kaupallisella puupelletillä kaikkein tummin, lähes täysin musta. Kierrätyspuupelletti on hieman vaaleampi, 25 % SRF:ää sisältävä vielä vaaleampi ja 50 % SRF:ää on vaalein. Kierrätyspuutuhkan seassa näkyy hieman sintrausta.



Kuva 40. Karelia-ammattikorkeakoulun toimittamat tuhkanäytteet polttokokeista

Taulukossa 18 näkyvät Karelia-ammattikorkeakoulun mitaamat polttoaineiden lujuusominaisuudet, kosteuspitoisuudet ja pommikalorimetrillä saadut lämpöarvot. Kosteuspitoisuus on mitattu standardista poiketen, koska näytekoko oli vain 100 g. Mittaus on suoritettu standardin mukaan kuivatusta materiaalista. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018.)

Taulukko 18. Polttoaineiden ominaisuudet ja lämpöarvot (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018)

	Kosteus-%	Mekaaninen kestävyys %	Kalorimetrinen lämpöarvo J/g	
			1. mittaus	2. mittaus
Peruspelletti	6	98,4	20121	20130
I näyte	12	93,9	20036	19914
II näyte	10	95,9	20652	20489
III näyte	8	86,5	20880	20888

Näytepelleteistä vain kaupallinen pelletti ylitti kuluttajapelleteiltä vaaditun kestävyysrajan 97,5 %. Huomioitavaa on, että Karelia-ammattikorkeakoulun (2018) testien mukaan 25 % SRF:ää sisältävä pelletti on ollut kierrätyspuupellettiä kestävämpää, vaikka aistinvaraisesti kierrätyspuupelletti vaikuttaa kestävämmältä. Eniten SRF:ää sisältänyt pelletti taas oli kestävyydeltään heikoin (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018). Mekaanisia ominaisuuksia pystytään edelleen parantamaan pellettien valmistusvaiheessa, joten on mahdollista, että standardin mukainen kestävyys saavutetaan (Pappinen 2018; Karelia-ammattikorkeakoulu 2018).

Taulukossa 19 näkyvät Karelia-ammattikorkeakoulun hiukkanalyysin tulokset, jossa mittauksen mittauslaitteena käytettiin MRU FSM -gravimetristä hiukkasmittaria. Pienhiukkaspitoisuus, eli alle 10 µm läpimitaltaan olevien hiukkasten määrä oli 50 % SRF:ää sisältävällä pelletillä korkea, mutta samalla sen häkä- ja happiarvot olivat hyvät, mikä Karelia-ammattikorkeakoulun mukaan viittaisi siihen, että näyte on palanut hyvin. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018.)

Taulukko 19. Hiukkanalyysien tulokset (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018)

	P.M. mg/m ³	P.M. mg/m ³ O2	CO ppm	CO mg/m ³ O2	O2 %
Peruspelletti	24,2	24,2	72	90	13
I näyte	51,4	70,8	283	492	15,2
II näyte	80,2	105,2	236	390	14,9
III näyte	218,7	230,2	38	50	13,4
Jätepolton raja- arvot (puolen tunnin keskiarvo 100% teholla)	30			100	11

Taulukossa 20 on näytteille suoritettujen pikakosteusmittauksen tulokset. Mittaus suoritettiin ennen täydentävien polttokokeiden suorittamista. Mittarina käytettiin Presica XM50 -kosteusmittausvaakaa. Kosteuspitoisuudet olivat pudonneet aiemmista mittaustuloksista, mikä Karelia-ammattikorkeakoulun (2018) mukaan johtuu mekaanisen lujuuden testauksesta. Näytteet oli säilytetty muovipusseissa. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018.)

Taulukko 20. Pikakosteusmittarilla suoritettu kosteusmittaus (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018)

Kosteusmittaus 20.6.2018			
	1. mittaus	2. mittaus	Keskiarvo
Peruspelletti	4,1	5,8	4,9
I näyte	8,2	8,5	8,3
II näyte	6,5	7,5	7,0
III näyte	6,7	7,0	6,9

Karelia-ammattikorkeakoulu suoritti täydentävät polttokokeet HylisFlame-polttimella ja mittasi savukaasujen typpimonoksidi- ja typpidioksidipitoisuudet. Polttimen lämpötila pidettiin matalana, alle 500 °C, joka esti ilman typen reagoimisen hapen kanssa. Karelia-ammattikorkeakoulun mukaan näin päästöjen voitiin olettaa olevan peräisin polttoaineesta. Polttokokeessa (taulukko 21) jokaisella näytepolttoaineella tehtiin 15 minuutin pituinen polttojakso, jonka aikana kerättiin mittauservoja noin minuutin välein. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018.)

Taulukko 21. Savukaasuanalysoinnin tulokset (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018)

	NO ppm	NO2 ppm	NOx ppm	T-gas °C
Puupelletti	7	1	8	102,1
I näyte	66	26	92	99
II näyte	64	21	85	101
III näyte	64	21	85	104
Jätepolton raja-arvot (puolen tunnin keskiarvo 97% teholla)		99 *		

Karelia-ammattikorkeakoulu esittää jatkotoimenpiteiksi polttoaineen polttotestausta suuremmassa mittakaavassa, joka vastaisi paremmin olosuhteita, joissa seospolttoaineita todellisuudessa käytettäisiin. Lisäksi tulisi testata suurempaa SRF:n osuutta seoksessa ja selvittää sen vaikutukset päästöihin, koska ainakin heidän testeissään kierrätyspuu vaikutti tuloksiin haitallisesti. (Karelia-ammattikorkeakoulu 2018.)

SGS Finland Oy suoritti polttoaineille analyysin, jossa mitattiin seosten ominaisuudet. Taulukkoon 22 on koottu jokaisen polttoaineen sisältö, josta niitä on helppo vertailla. Taulukon arvoja vertailemalla 25 % SRF / 75 % kierrätyspuu -seos vaikuttaisi parhaimmalta polttoaineelta. Lämpöarvo oli jopa enemmän SRF:ää sisältävää seosta parempaa, vaikka 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta sisältävä pelletti oli kosteampaa. Tuhkaa tulee sitä enemmän, mitä enemmän seoksessa on SRF:ää. Vedyn osalta tulos näyttää omituiselta, koska muilla polttoaineilla arvo on huomattavasti korkeampi kuin 25 % SRF / 75 % kierrätyspuu -seoksella.

Taulukko 22. SGS Finland Oy:n polttoaineanalyysien tulokset (SGS Finland Oy 2018)

	50 % SRF / 50 % kierrätyspuu	25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	Kierrätyspuu
Kosteus	5,6 %	6,4 %	8,60 %
Tuhka 550 °C, vedetön	6,44 %	4,7 %	2,51 %
Tuhka 550 °C saapumistilassa	-	4,4 %	-
Kloori, vedetön	0,46 %	0,42 %	0,10 %
Rikki, vedetön	0,11 %	0,11 %	0,04 %
Hiili (C), vedetön	49,4 %	51,10 %	49,20 %
Vety (H), vedetön	6,55 %	1,20 %	6,47 %
Typpi (N), vedetön	1,64 %	1,20 %	1,88 %
Tehollinen lämpöarvo, saapumistila	18,00 MJ/kg	18,06 MJ/kg	16,87 MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo, vedetön	-	19,46 MJ/kg	-
Kalorimetrinen lämpöarvo, vedetön	20,55 MJ/kg	20,72 MJ/kg	20,01 MJ/kg
Happi, vedetön	36,1 %	36,8 %	40,00 %

6.3 Seospelletöinnin kannattavuus

Tiivistetyn, eli pelletöidyn, materiaalin merkittävimpiä etuja on säästöt varastoinnissa sekä kuljetuksessa. Suhonen Consulting Oy:n (2017) mukaan kevyen materiaalin kuljettaminen maksaa 6 €/tn, kun taas tiivistetyn SRF:n 3,75 €/tn. Tiivistettyä materiaalia mahtuu kuormaan 40 000 kg, kun tiivistämätöntä pystytään kuljettamaan vain 25 000 kg.

Koepelletöinnin suorittanut Konepaja M. Pappinen Oy (2018) laski materiaaleille irtotiheydet, joiden avulla voidaan suorittaa laskelmia. Laskuissa käytetyt irtotiheydet ovat taulukosta 23.

Taulukko 23. Irtokuutiopainot (Konepaja M. Pappinen Oy 2018)

Tuote	Irtotiheys kg/m ³
Hienonnettu puumurske	143
Puumurske	180
Purkupuru	270
SRF	95
Hienonnettu SRF	63
Puupelletti	610 - 620
50 % SRF / 50 % kierrätyspuu	520 - 530
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu	620 - 640

Suhonen Consultin Oy:n materiaaleissa ei kerrota tarkemmin, kuinka heidän laskelmansa on laskettu. Kuorman kokoa ei kerrota, mutta sen voi olettaa rajautuvan kevyellä, tiivistämättömällä materiaalilla tilavuuteen ja tiivistetyn kohdalla painoraja tulee vastaan. 25 000 kg on siis tiivistämättömän materiaalin paino, jonka kuljetuksessa tulee tilavuuden raja vastaan. Lasketaan kuinka paljon 25 000 kg SRF:ää tarvitsee tilaa:

$$x = \frac{25\,000\text{ kg}}{95\text{ kg/m}^3}$$

$$x = 263,2\text{ m}^3$$

25 000 kiloa tiivistämätöntä SRF:ää vie tilaa 263,2 kuutiometriä. Käytettävissä oleva kuljetuskapasiteetti on siis 263,2 kuutiometriä. Yhteen kuutiometriin mahtuu Konepaja M. Pappinen Oy:n (2018) laskemien irtokuutiopainojen perusteella 620 kiloa 25 % SRF / 75

% kierrätyspuuta sisältävää pellettiä. Jos koko kuljetuskapasiteetti käytettäisiin hyväksi, eikä välitettäisi painorajoista, kuormaan mahtuisi seuraavan laskun mukaan 163 184 kg seospellettiä.

$$263,2 \text{ m}^3 * 620 \text{ kg} = 163 184 \text{ kg}$$

Samaan kuormaan mahtuisi siis vain tilavuus huomioiden joko 25 000 kg SRF:ää tai 163 000 kg tiivistettyä seospellettiä. Suhonen Consulting Oy:n laskujen perusteella oletettavasti painoraja on kuitenkin 40 000 kg, joten aivan täyttä hyötyä pelletöinnistä ei tässä tapauksessa saataisi. Kiinteässä varastoinnissa painorajat tuskin ovat vastassa, joten siinä saataisiin täysi hyöty. Varastoinnissa tosin voi mahdolliset palokuorman rajoitukset tulla vastaan, joten ne täytyy huomioida.

Konepaja M. Pappinen Oy:n (2018) ilmoittamista irtokuutioiden painoista pystyy laskemaan, kuinka paljon vähemmän kukin materiaali vie tilaa tiivistettynä. Taulukossa 24 on havainnollistettu, kuinka puumurske verrattuna pelletöityyn puumurskeeseen on 3,4 kertaa enemmän tilaa vievää, kun taas 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta sisältävä seos on jopa 6,6 kertaa tehokkaampaa tilankäytöltään kuin tiivistämätön SRF. Yksi kuorma seospellettiä voi siis vastata jopa 6,6 kuormaa SRF:ää. Pelletöimällä materiaalit saavutetaan siis huomattava tilansäästö varastoinnissa ja kuljetuksessa.

Taulukko 24. Laskelmia siitä, kuinka paljon enemmän tiivistettyä materiaalia mahtuu samaan tilaan kuin tiivistämätöntä

Vertailtavat	Kerroin
Puumurske verrattuna puupellettiin	3,4
Puumurske verrattuna 25 % SRF / 75 % kierrätyspuupellettiin	3,5
Puumurske verrattuna 50 % SRF / 50 % kierrätyspuupellettiin	2,9
SRF verrattuna puupellettiin	6,5
SRF verrattuna 25 % SRF / 75 % kierrätyspuupellettiin	6,6
SRF verrattuna 50 % SRF / 50 % kierrätyspuupellettiin	5,5
50 % SRF / 50 % kierrätyspuupelletti verrattuna 25 % SRF / 75 % kierrätyspuupellettiin	1,2
Puupelletti verrattuna 25 % SRF / 75 % kierrätyspuupellettiin	1,02

Myös energiatiheys kasvaa samoilla kertoimilla, kun polttoaine puristetaan pienempään tilaan. Yksi kuorma pelletöityä polttoainetta sisältää moninkertaisesti energiaa verrattuna

tiivistämättömään. 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta sisältävä pelletti on irtotiheydeltään 6,6 kertaa SRF:ää tiheämpää. SGS Finland Oy:n (2018) analyysien perusteella 25 % SRF / 75 % kierrätyspuu -pelletin kalorimetrinen lämpöarvo on 20,72 MJ/kg, kun taas SRF:n kalorimetrinen lämpöarvojen keskiarvo on 24,4 MJ/kg. Samaan tilaan, mihin mahtuisi 24,4 MJ edestä SRF:ää mahtuu 136,7 MJ 25 % SRF:ää / 75 % kierrätyspuuta sisältävää pellettiä. Taulukossa 25 on esitetty eri polttoaineiden energiasisältö. Oletan kierrätyspuupelletin irtotiheyden olevan sama kuin kaupallisella puupelletillä.

Taulukko 25. Polttoaineiden energiasisällöt kuutiometrille

Polttoaine	MJ/m ³
SRF	24,4
50 % SRF / 50 % kierrätyspuu -seospelletti	113,0
25 % SRF / 75 % kierrätyspuu -seospelletti	136,7
Kierrätyspuupelletti	130,0
Kaupallinen puupelletti	107,6

7 YHTEENVETO

Työssä tutustuttiin jäteperäisiin polttoaineisiin, niiden pelletointiin ja polttamiseen käytännössä. Käytännön vaiheissa ilmeni ongelmia, mutta jatkoa ajatellen on hyvä, että tulivat ajoissa esille. Esimerkiksi pelletöinnin aikana itse materiaali tuotti niin paljon ongelmia, että jatkossa jätteen pelletointia varten kannattaa hankkia kyseiselle polttoaineelle soveltuva pellettipuristin, eikä yrittää käyttää puulle tarkoitettua puristinta. Varsinkin paljon SRF:ää sisältävät seokset käyttäytyvät niin eri tavalla puuhun verrattuna, että pellettipuristimen tuotto jää hyvin vaatimattomaksi. Vaadittavat muutokset normaaliin puulle tarkoitettuun pellettipuristimeen eivät todennäköisesti ole kovin suuret. Syöttöongelma ratkeaa todennäköisesti vain avartamalla syöttökaukaloa, mutta muovin viskositeettiongelma on hieman hankalampi ja vaatisi jatkotutkimusta, tai seoksen SRF-pitoisuuden pitämistä matalana.

Tulevaisuudessa tutkimusta tulisi mielestäni jatkaa juuri pelletointilaitteistoa kehittämällä sekä mahdollisesti uusilla polttokokeilla. Toivotunlaisen seossuhteen löytäminen voisi olla ensimmäinen askel, jonka ympärille mahdollista jatkoa aletaan suunnitella.

Seossuhteessa pitää ottaa huomioon monia asioita pellettien ominaisuuksien kannalta, kuten myös valmistajan ja polttolaitoksen kanalta. Päätetyn seossuhteen ympärille on helpompi suunnitella esimerkiksi, mitä muutoksia pellettipuristin vaatii tai tarvitaanko pelletteihin lisäaineita.

Pellettipuristimella on suuri merkitys tuotannon tehokkuuteen, mutta myös pelletin laatuun. Karelia-ammattikorkeakoulun (2018) mukaan pelleteistä voi saada huomattavasti parempia oikeanlaisella puristimella. Matti Pappisen (2018) mukaan pelletointi ei välttämättä ole paras ratkaisu seospolttaineiden tiivistämiseen, vaan briketointi voi olla puristustekniikkana parempi. Perusteluksi Pappinen (2018) mainitsi, että briketöidessä seoksella tai materiaalin laadulla ei juurikaan ole väliä, kun se tapahtuu niin kovalla paineella. Polttolaitokselle tuskin on mitään väliä, missä muodossa puristettu polttoaine toimitetaan.

Koepoltot eivät sujuneet aivan odotetulla tavalla, tosin mielenkiintoisia tuloksia niistäkin tuli. Tulevaisuudessa koepoltot voisi mahdollisesti uusien seospelleteille soveltuvalla polttimella, koska tässä opinnäytetyössä käytetty poltin ei jäteperäisellä polttoaineella toiminut. Jatkotutkimuksissa voisi myös olla hyödyllistä mitata seospellettien savukaasujen haitta-aineiden määrät eri seossuhteilla, jotta niitä voisi verrata raja-arvoihin. Tällä hetkellä haitta-aineiden määrät on mitattu vain kummastakin materiaalista erikseen.

Tiivistetyssä jätepolttoaineessa on mielestäni kuitenkin niin suuret hyödyt, että tutkimusta tulisi jatkaa. Kuljetuskustannukset ja varastointi tuottavat säästöjä, jotka pidemmällä aikavälillä voivat olla merkittäviä. Varsinkin kuljetuksessa säästäminen ja tehokkuuden lisääminen on ympäristöteko, mutta myös varmasti rahallisestikin kannattava.

Mielestäni opinnäytetyöaiheeni oli mielenkiintoinen ja kaikki sujui pienistä vastoinkäymisistä huolimatta hyvin. Suuret kiitokset PHJ:n kehityspäällikölle Antti Leiskalliolle sekä kehityskoordinaattori Jani Vehviläiselle, joka avusti mittavasti opinnäytetyössäni.

LÄHTEET

Ekholm, L. 2018a. Asiakkuuspäällikkö. Energon Oy. Keskustelu 24.5.2018.

Ekholm, L. 2018b. VS: Pellettikokeet LAMK. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Itkonen. V. Lähetetty 11.7.2018.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi jätteistä 2008/98. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=SK>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tiettyjen keskisuurista polttolaitoksista ilmaan joutuvien epäpuhtauspäästöjen rajoittamisesta 2015/2193. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2015/2193/oj>

Karelia-ammattikorkeakoulu 2018. Seospolttoaineiden savukaasu- ja hiukkasanalyysit sekä energiasisällön määrittäminen. Joensuu: Karelia-ammattikorkeakoulu.

Kokkonen, A. 2018. VS: Seospellettien polttokoe. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Launonen, P. Lähetetty 3.10.2018.

Konepaja M. Pappinen Oy. 2018. Yhdyskuntajätteen pelletointikokeet. Joensuu: Konepaja M. Pappinen Oy.

Korri, J. 2011. Selvitys kierrätyspolttoainejakeiden ominaisuuksista ja soveltuvuudesta kaasutus-CHP-laitoksen polttoaineeksi. Pro gradu -tutkielma [viitattu 7.11.2018]. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/37055/URN:NBN:fi:jyu-2011120811775.pdf?sequence=1>

Pappinen, M. 2018. Toimitusjohtaja. Konepaja M. Pappinen Oy. Keskustelu 15.5.2018.

PHJ. 2018a. Lajitteluohje [viitattu 29.10.2018]. Saatavissa: <https://www.phj.fi/neuvonta/jatehaku/>

PHJ. 2018b. Yritysinfo [viitattu 11.9.2018]. Saatavissa: <https://www.phj.fi/yhtio>

SFS-EN ISO 15359, 2011. Kiinteät kierrätyspolttoaineet, vaatimukset ja luokat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 17225-2, 2011. Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja -luokat. Osa 2: Luokitellut puupelletit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 18134-2, 2017. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Unikuivausmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SGS Finland Oy. 2018. Polttoaineiden analyysiraportit. Kotka: SGS Finland Oy.

Suhonen Consulting Oy. 2017. Teollisuus- ja torrefioidun pelletin tuotannollinen selvitystyö. Lahti: Suhonen Consulting Oy.

Tilastokeskus. 2018. Polttoaineluokitus 2018 [viitattu 7.11.2018]. Saatavissa:

https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_maaritelmat_2018.pdf

Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 151/2013. Saatavissa:

<https://www.finlex.fi/data/sdliite/liite/6182.pdf>

Versowood. 2018. Verso Hotti-lämmityspelletti, tuotekortti. Vierumäki: Versowood Group Oy [viitattu 21.6.2018]. Saatavissa:

https://hotti.versowood.fi/index.php?controller=attachment&id_attachment=3

Vilenius, S. 2014. Arinakattilan hyötysuhteen määrittäminen jätteen energiahyödyntämisessä. Diplomityö. [viitattu 7.11.2018]. Saatavissa:

<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22818/Vilenius.pdf;sequence=1>

VTT. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy [viitattu 11.9.2018]. Saatavissa:

<https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Ympäristöministeriö. 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta -tutkimusraportti. Jyväskylä: Ympäristöministeriö ja Energiategollisuus ry [viitattu 28.9.2018]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BC1EA01A4-C78E-4152-A601-3AE51323EDEB%7D/119826>

LIITTEET

Liite 1. Puun ja SRF:n sekoittaminen