

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2023

Kasper Kettula

**Syksyllä niitettyjen järviruokojen
hyödyntäminen
seospolttoaineena paikallisessa
energiantuotannossa**

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2023 | 57+9 sivua

Kaspero Kettula

Syksyllä niitetyjen järviruokojen hyödyntäminen seospolttoaineena paikallisessa energiantuotannossa

Opinnäytetyössä tutkittiin, onko lintuvesistöjen parannustarkoituksessa suoritetuista järviruovikoiden syysniitoista kerättyä silputtua ruokobiomassaa taloudellista ja tehokasta hyödyntää seospolttoaineena metsätalouden sivuvirtojen rinnalla lähellä sijaitsevassa 1 MW:n biolämpölaitoksessa.

Työn osana mitattiin perusteellisesti järviruon ja puuhakkeen fyysiset ja kemialliset ominaisuudet laboratorio-olosuhteissa. Selvitettyjä arvoja käyttäen suoritettiin lämpölaitoksella koepolttoja tunnetuilla polttoaineseoksilla palamisen hyötysuhteiden selvittämiseksi. Tämän jälkeen polttoaineseosta alettiin käyttää osana laitoksen päivittäistä toimintaa ja seurattiin seoksen polttamisen vaikutuksia sekä arvioitiin sen soveltuvuutta laitostyöhön kuljetinlaitteiston, energian tuotannon sekä taloudellisten vaikutusten kannalta.

Tehtyjen selvityksien ja laskelmien perusteella todettiin, että pieni määrä ruokoa sekoitettuna puuhakkeeseen voi huomattavasti parantaa palamisen hyötysuhdetta. Kustannusarvioiden valossa todettiin kuitenkin, että ruon polttamisen tuoma taloudellinen etu on nykyisillä hinnoilla niin pieni, ja optimaalisen hyötysuhteen saavuttamiseen vaadittavat olosuhteet ovat niin tarkat, että tämän kokoluokan laitoksissa järviruon hyödyntäminen ei ole vielä taloudellisesti kannattavaa.

Asiasanat:

Järviruoko, bioenergia, polttoaineet

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy- and Environmental Technology

2023 | 57+9 Pages

Kasper Kettula

Fall-harvested Common Reed as a Mixture Fuel in Local Energy Production

This thesis is a study on whether shredded common reed harvested in autumn, as part of preservation efforts of bird ponds, is an economical and efficient mixture fuel alongside forestry side streams in a nearby 1 MW biothermal power plant.

During the study the physical and chemical properties of both reed and wood chips were thoroughly measured under laboratory conditions. Using the measured values, test batches with different mixture ratios were burnt in the power plant to determine the thermal efficiencies of used fuels. After the test runs, the plant began burning the fuel mixture on a larger scale as a part of its daily operation for several weeks, during which time the fuel mixture's effects on the plant were closely monitored. Assessments were made regarding the reed mixture's suitability for the plant's conveyor machinery, energy production and economical effects.

Based on the completed assessments and calculations, it was noted that a small amount of reed mixed with the primary fuel does indeed noticeably increase the thermal efficiency of the plant. However, according to the cost estimates, the financial advantage gained is so small, and the conditions that need to be met to achieve the desired efficiency so precise, that a plant of this size cannot yet utilize reed in a way that would be economically viable.

Keywords:

Common reed, bioenergy, fuels

Sisältö

1 Johdanto	7
1.1 Työn tausta ja tavoite	8
1.2 Miksi polttaa ruokoa?	9
2 Järviruoko	10
2.1 Ruo'on kausilaadut	10
2.2 Ruoko polttoaineena	12
2.2.1 Kosteuden ja tuhkapitoisuuden vaikutukset	13
2.2.2 Ruo'on tuhkan ominaisuudet	14
3 Ruo'on tuotanto	15
3.1 Niitto	15
3.2 Logistiikka	16
4 Polttokokeet	18
4.1 Taivassalon lämpölaite	18
4.1.1 Laitoksen tilat	18
4.1.2 Polttokattila	19
4.1.3 Laitoksen ohjausjärjestelmä	20
4.1.4 Tuhkan keräys	20
4.2 Polttoaineiden ominaisuuksien mittaus	21
4.2.1 Työn tarkoitus ja periaatteet	21
4.2.2 Välineet ja laitteet	23
4.2.3 Työturvallisuus ja haitalliset aineet	23
4.2.4 Töiden suoritus	24
4.2.5 Virhetarkastelu	29
4.3 Tuhkan alkuainepitoisuudet	32
4.4 Pienen kaavan koepoltot	32
4.4.1 Polttoaineiden ominaisuudet	33
4.4.2 Koe-erät	35
4.4.3 Koepolttojen tulokset	35

4.4.4 Koepolttojen virhetarkastelu	36
4.5 Suuren kaavan polttokokeet	37
4.5.1 Polttoaineseokset ja holvaantumisen ehkäisy	37
4.6 Kustannuslaskelmat	39
4.6.1 Hankkeen näkökulma	40
4.6.2 Lämpölaitoksen näkökulma	41
4.6.3 Tulevaisuudessa	42
5 Ruokoseoksen polttamisen vaikutukset	44
5.1 Vaikutus energiantuotantoon	44
5.2 Fyysiset vaikutukset kattilaan	44
5.3 Tuhkan tuotanto	45
5.4 Taloudelliset vaikutukset	46
6 Haasteita ruo'on laajamittaisessa poltossa	47
6.1 Logistiikka	47
6.2 Lainsäädännölliset haasteet	48
6.2.1 Jätteen poltto	48
6.2.2 Niittojen luvanhanhinta	49
6.3 Biomassan luonnolliset prosessit	50
7 Johtopäätökset	52
7.1 Mittaukset ja tulokset	52
7.2 Logistiikka & käytännöllisyys	53
7.3 Sivutuotteet	54
8 Loppupäätelmät	55
Lähteet	56

Liitteet

- Liite 1. Laboratoriomittausten tulokset
- Liite 2. Tuhkien alkuainepitoisuudet
- Liite 3. Koepolttojen mittauspöytäkirjat

Kuvat

Kuva 1. Syysruokoa.	11
Kuva 2. Niittokoneisto Rantalanlahdella.	15
Kuva 3. Ruokomassan tuotanto- ja logistiikkaketju kartalla. (Ilmakuva: Maanmittauslaitos, avoin WMTS-rajapinta, ortokuva, haettu 10/2023)	17
Kuva 4. Lämpölaitoksen ohjauspaneelin käyttöliittymä.	19
Kuva 5. Esilämmityspelletti aseteltuna polttoupokkaaseen.	26
Kuva 6. Tabletin palaminen on keskeytynyt sen laskeutuessa astian pohjalla olevaan veteen.	27
Kuva 7. Hiiltynyttä materiaalia hajotusastian pohjalla.	31
Kuva 8. Mikroskooppikuvia järviruokotuhkasta.	34
Kuva 9. Ruokomassa on tukkinut kokoojaruuvien syöttöaukon.	38
Kuva 10. Polttoaineseosta risteysuppilossa.	39
Kuva 11. Laitoksen tuhkasäiliö ennen ruokojen polttamista ja sen aikana.	45
Kuva 12. Kuljetuskustannukset olkimateriaaleille kuorma-autolla (Komulainen, ym., 2008).	47

Taulukot

Taulukko 1. Laboratorioissa käytetyt välineet ja laitteet.	23
Taulukko 2. Koepoltoissa mitatut arvot.	33
Taulukko 3. Polttoaineille testeissä mitatut ominaisuudet.	33
Taulukko 4. Koepolttojen tulokset.	36
Taulukko 5. Kustannustehokkuuden muutos suhteessa puun hintaan.	42

1 Johdanto

Energian kulutuksen ja energiaomavaraisuuden merkityksen kasvaessa, ja metsätalouteen kohdistuvan ympäristöpaineen myötä molempien alojen toimijoiden keskuudessa on jatkuva tarve saada omia toimintojaan tehostettua.

Suomessa on paljon pieniä biolämpölaitoksia, jotka hyödyntävät pääpolttoaineenaan metsäteollisuuden sivuvirtoja. Tämä on järkevä tapa saada muutettua muuten rajallisesti hyödynnettävissä olevaa sivutuotetta uusiutuvaksi energiaksi, mutta pitkällä aikatahtimella on nähtävissä trendimuutos, joka puskee energiantuotantomenetelmiä kohti vieläkin ympäristöystävällisempiä ratkaisuja. Tämän murroksen aikana kiinteää biopolttoainetta hyödyntävät laitokset tarvitsevat enenevässä määrin uusia tapoja vähentää- ja optimoida polttoaineen kulutustaan. Tähän yksi potentiaalinen ratkaisukeino on puuhakkeen palamisen tehostaminen järviruo'oilla.

Järviruovikoita on pelkästään Etelä-Suomen rannikoilla vuonna 2006 tehdyn satelliittikartoituksen mukaan yli 30 000 hehtaaria (Pitkänen 2006). Ruovikot aiheuttavat varsinkin Itämeren alueella useita haasteita ympäristölle, jos niiden annetaan kasvaa itseksensä: ruoko muun muassa sitoo itseensä merkittäviä määriä ravinteita, jotka palaavat vuosittain takaisin maaperään, edesauttaen rannikoiden rehevöitymistä. Vuosittain uusiutuvat ruovikot tihenevät vauhdikkaasti, kasvattaen vuosittain jälkeensä jättämää biomassaa. Nämä massat aiheuttavat haittaa sekä ihmisille, että ympäristölle. Mädäntyessään monivuotinen ruokomassa tuottaa pahanhajuisia päästöjä, jotka näkyvimmin haittaavat rannikoiden virkistyskäyttöä (Myllyniemi and Virtanen 2013). Lisäksi tihenevät ruovikot kasvattavat rannikoita umpeen haitaten esimerkiksi veneliikennettä ja lintujen pesintää merkittävästi.

Näistä syistä järviruokoa niitetään erilaisten ympäristönparannushankkeiden osana rannikoilla. Hankkeiden rahoitus kattaa kuitenkin normaalisti vain ruovikoiden niittämisen, mutta ei keräystä. Ympäristön näkökulmasta niitetyn ruokomassan kerääminen on kannattavampaa, sillä jos leikattu biomassaa

jätetään paikoilleen, se mädäntyy ja luovuttaa sisältämänsä ravinteet takaisin maaperään, jolloin niittojen positiiviset ympäristövaikutukset jäävät lyhytikäisiksi.

1.1 Työn tausta ja tavoite

Tämä opinnäytetyö on tehty osana Turun ammattikorkeakoulun Ympäristöministeriön Helmi-rahoituksella toteuttamaa Ruokohelmi II-hanketta, jonka tavoitteena on vesistöjen, rannikoiden ja ruovikoiden elinolosuhteiden parantaminen muun muassa niittämällä järviruovikoita kohdealueilla Paraisissa, Uudessakaupungissa ja Taivassalossa.

Työn tavoitteena on ensisijaisesti selvittää, onko syksyllä niitettyä järviruokoa taloudellista ja käytännöllistä hyödyntää seospolttoaineena puuhaketta primääripolttoaineena käyttävässä biolämpölaitoksessa. Tutkimus suoritettiin Taivassalon lämpölaitoksella, joka sijaitsee erään kohderuovikon läheisyydessä. Tämä työ perustuu- ja täydentää osin samassa laitoksessa aiemmin toteutettua tutkimusta, jossa tutkittiin ruo'on talvilaadun polttamista yksittäisten koe-erien muodossa. Tutkimuksessa todettiin talviruo'on tehostavan lyhyiden polttokokeiden aikana puuhakkeen palamista huomattavasti. Ruo'on hyödyntämistä haittaaviksi tekijöiksi mainittiin muun muassa niittokaluston alkeellisuus sekä tuotantoketjun tehottomuus (Moisalo 2011). Tästä tutkimuksesta on kuitenkin kulunut aikaa jo yli 12 vuotta, jona aikana tuotantoketjut sekä niittomenetelmät ovat kehittyneet ja virtaviivaistuneet huomattavasti, minkä vuoksi tutkimusten ja talousarvioiden uudelleentoteuttaminen on perusteltua. Kokeiden taloudellisuutta hankkeessa arvioitiin laskemalla, että saadaanko korotetun hyötysuhteen tuottamalla säästöillä katettua keruuniiton tuottamat lisäkustannukset.

Tämän lisäksi suurin osa järviruokojen energiakäyttöön tehdyistä tutkimuksista, edellä mainittu mukaan lukien, on toteutettu talviruo'oilla. Tämä on monessa tapauksessa hyvin perusteltua, sillä talviruoko on ominaisuuksiltaan muita ruokolaatuja otollisempaa polttoainetta: talvella niitetty ruoko on huomattavasti kuivempaa kuin muut ruo'on kausilaadut, ja se sisältää paljon vähemmän

polttokattiloille potentiaalisesti haitallisia ravinteita ja kivennäisaineita. Talviruo'on niitossa ja keräämisessä on kuitenkin lukuisia haasteita, jotka voidaan välttää pelkästään leikkuuajankohtaa muuttamalla. Työn toisena tavoitteena on näin ollen punnita syysruo'on käytännöllisyyttä seospolttoaineena verrattuna muihin ruokolaatuihin seuraten ja kartoittaen sen fyysisiä ja kemiallisia ominaisuuksia, sekä taloudellisuutta ja verraten niitä muista ruokolaaduista kerättyyn tietoon.

1.2 Miksi polttaa ruokoa?

Järviruoko on nopeasti uusiutuva luonnonvara. Aktiivisesti hoidettujen ja säännöllisesti niitettujen alueiden tuottama järviruoko soveltuu todella hyvin esimerkiksi rakennusteollisuuden käyttöön, mikä on esimerkiksi Alankomaissa ja Baltian maissa verrattain yleinen tapa hyödyntää ruovikoita. Suomessa ruokotalous on kuitenkin verrattain alkeellisella tasolla ja rakennustekniikkaan soveltuvia hyvälaatuisia ruovikoita on vain harvakseltaan.

Järviruokojen kelpoisuutta rakennuskäyttöön voidaan mitata esimerkiksi laatuasteikolla 1–4 (Silén 2007), jossa 1 on rakentamiseen erinomaisesti soveltuva, 2 on soveltuva, ja 3 ja 4 ovat huonosti soveltuvia. Ruo'on laatu on monen tekijän summa, joista merkittävin on kuitenkin ruovikon hoitoaste. Jos ruovikko on päässyt kasvamaan villinä vuosikausia, se on tavallisesti niitettävä vuosittain 2–3 vuoden ajan ennen kuin sen tuottama ruoko täyttää sille asetetut laatustandardit. Siihen asti ruoko soveltuu lähinnä maanparannusaineeksi, kompostimateriaaliksi, biokaasun tuotantoon tai polttoaineeksi.

2 Järviruoko

Järviruoko (*Phragmites australis*) on monivuotinen pystyvartinen rannikoilla viihtyvä ruokokasvi, jota tavataan lähes jokaisella mantereella. Ruo'on varsi on ontto, 2–6 millimetriä paksu ja se koostuu noin 15–25 senttimetrin pituisista paloista, jotka liittyvät toisiinsa muuta vartta hieman leveämmissä solmukohdissa. Ruo'on lehdet ovat pitkiä ja kapeita, ja sen varren päässä on tuuhea tupsu, eli röyhy. Suomen olosuhteissa ruo'ot kasvavat yleisimmin noin 1–3 metriä korkeiksi, mutta ravinteikkaissa ympäristöissä ne voivat kasvaa vielä pidemmiksikin (Roosaluste 2006).

Nimestään huolimatta järviruoko viihtyy erittäin hyvin paitsi järvien-, myös merien – etenkin Itämeren – rannoilla. Ruo'ot kasvavat nopeasti ja niiden kasvuympäristöt muodostuvat tavallisesti massiivisiksi ruovikoiksi, joita näkee usein järvien- ja merenrantojen yhteydessä. Nämä ruovikot voivat olla pinta-alaltaan useiden kymmenien hehtaarien suuruisia. Pituutensa vuoksi ruoko selviää hyvin rantaviivan molemmilla puolilla, ja matalilla rannikoilla ruovikot voivat levitä jopa kymmenien metrien päähän rannasta.

2.1 Ruo'on kausilaadut

Järviruo'on ominaisuudet vaihtelevat suuresti eri vuodenaikoina. Keväisin ja alkukesästä ennen kukinta-aikaa ruoko sitoo itseensä maaperästä suuret määrät ravinteita, kuten fosforia ja typpeä. Tähän aikaan ruoko on väriltään rehevän vihreää ja sen kosteussisältö voi olla jopa 70–80 % (Joensuu, ym. 2014). Kesälaadun sisältämien ravinteiden vuoksi ruovikoiden niittäminen kesäaikaan on tarkoituksenmukaista, jos halutaan esimerkiksi poistaa ravinteita ruovikon kasvualustalta ja hillitä tulevien vuosien ruovikoiden tiheyttä. Kesäniittoja vaikeuttaa kuitenkin esimerkiksi lintujen pesimäaika, joka ei saa häiriintyä niittojen seurauksena. Tästä syystä esimerkiksi ELY-keskukset ovat vastahakoisia myöntämään niittolupia kesäaikaan, joten normaalisti ruovikoiden niitot pyritään ajoittamaan syksylle ja talvelle.

Kesän loputtua ja syksyn edetessä ruo'on sitomat ravinteet palaavat hiljalleen maaperään, jolloin ruo'on väri muuttuu kellertäväksi ja sen kosteuspitoisuus laskee noin 40–50 % tasolle. Ruo'ot säilyttävät tällöin vielä lehtensä sekä röyhynsä (Kuva 1).



Kuva 1. Syysruokoa.

Talvella ruo'on kosteus on matalimmillaan 15–20 %, ja se sisältää enää vain 30–40 % kesäruo'on ravinnemäärästä (Ajosenpää 2014). Talviruoko on väriltään kellertävää tai vaalean ruskeaa, ja se useasti varistaa pois lehtensä ja tupsunsa johtuen sen suhteellisesta kuivuudesta, sekä pakkasen, tuulen, lumen ja jään vaikutuksesta. Talvella kuitenkin hehtaarituotto maalla niitetyltä ruo'olta on huomattavasti pienempi kuin muina vuodenaikoina, sillä normaali leikkuukalusto ei pysty leikkaamaan paksun lumikerroksen alta. Tällöin ruo'osta voi jäädä maahan jopa 50–60 cm pituista sänkeä (Moisalo 2011).

2.2 Ruoko polttoaineena

Polttoaineiden keskeisimpiä ominaisuuksia mitataan niiden lämpöarvoilla. Lämpöarvolla ilmaistaan aineen energiasisältö massa- tai tilavuusyksikköä kohden, ja se ilmoitetaan normaalisti muodossa MJ/kg tai MJ/m³. Kiinteillä polttoaineilla puhutaan yleensä niiden kalorimetrisestä-, eli ylemmästä lämpöarvosta, jolla ilmaistaan kuivan polttoaineen energiasisältö massayksikössä. Ylemmän lämpöarvon lisäksi polttoaineilla on myös tehollinen- eli alempi lämpöarvo, jolla ilmaistaan tuoreen tai kostean polttoaineen energiasisältöä massayksikköä kohden.

Järviruo'on ylempi lämpöarvo vaihtelee välillä 17–19 MJ/kg (Kask ja Kask 2011), mikä on hyvin pitkälti samaa luokkaa erilaisten puumateriaalien, kuten pellettien ja hakkeen lämpöarvojen kanssa, jotka vaihtelevat välillä 18–20 MJ/kg (Kask 2007). Ruo'on alempi lämpöarvo kuitenkin on hyvin pitkälti riippuvainen silputun ruo'on irtotiheydestä ja kosteudesta. Kirjallisuudessa mainitut järviruo'on energiatiheydet vaihtelevatkin todella paljon keskenään: kirjassa *Guidebook of Reed Business* (Kask ja Kask 2011) mainitaan ruo'on energiatiheydeksi 3.9 MWh/t, kun taas opinnäytetyössä *Järviruo'on talvilaadun hyödyntäminen paikallisena bioenergiana* (Moisalo 2011) talviruo'on energiatiheydeksi mitattiin 0,26 MWh/m³ ja tilavuuspainoksi 101 kg/m³, mikä vastaa noin 2,57 MWh/t. Moisalonn työssään mittaama energiatiheys tilavuutta kohden on taas puolet suurempi kuin julkaisussa *Ruokoenergiaa: järviruo'on energiakäyttömahdollisuudet Etelä-Suomessa* (Komulainen, ym. 2008), jossa silputun järviruo'on energiatiheydeksi mainitaan 0,13 MWh/irtokuutio.

Silputun ruo'on energiasisällön mittaamiselle ei ole standardoituja, tai edes vakiintuneita käytäntöjä, sillä ruoko ei ole onnistunut turvaamaan itselleen vakiintunutta paikkaa yleisesti tunnettujen polttoaineiden joukossa. Esimerkiksi Tilastokeskuksen ylläpitämässä Polttoaineluokitus-palvelussa, jossa luetteloidaan tunnettujen polttoaineiden ominaisuuksia päästöarvoista lämpöarvoihin ei mainita järviruo'koa (Tilastokeskus 2023). Muun muassa

näiden seikkojen takia eri lähteiden mittaustulokset eroavat toisistaan paljon, ja ne ilmoitetaan eri muodoissa tai eri suureilla ilmaistuna.

2.2.1 Kosteuden ja tuhkapitoisuuden vaikutukset

Polttoaineen kosteuden vaikutus sen alempaan, eli teholliseen lämpöarvoon on merkittävä, sillä vaikka aineen sisältämä energiamäärä ei muutu kosteuden vaikutuksesta, sen massa kasvaa lineaarisesti kosteuden mukana. Massan kasvaminen lämpöarvon pysyessä samana tarkoittaa, että polttoaineesta saadaan vähemmän energiaa massayksikköä kohden, mikä näkyy esimerkiksi logistiikan kulujen kasvuna sekä polttolaitoksen kuljetinlaitteistojen kokemana lisäkuormituksena, joka pienentää laitoksen kokonaisenergiatehokkuutta.

Vesi ei lähtökohtaisesti edesauta palamisprosessia, joten polttoaineen sisältämä kosteus on palamisen kannalta käytännössä hyödytöntä. Korkea kosteus vaikuttaa haitallisesti palamisen puhtauteen, ja todella huonolaatuisessa ja matalalla lämpötilalla tapahtuneessa palamisessa vettä voi kondensoitua savukaasujen poistokanaviin. Kanaviin kerääntynyt vesi alentaa palolämpötilaa entisestään, mikä aiheuttaa muun muassa tehon alenemista ja nokeentumista.

Tuhka on polttoaineen sisältämää palamatonta ainesta, jolla ei siis ole lämpöarvoa. Talvella niitetyn järviruo'on tuhkapitoisuus vaihtelee 2,1–4,2 % välillä, mutta kesäisin tuhkapitoisuuden on mitattu nousevan jopa 6,2 prosenttiin (Kask 2007).

Jos aineen tuhkapitoisuus ja ylempi lämpöarvo tunnetaan, voidaan polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa laskea standardin ISO 21654 (SFS 2021) mukaisesti kaavalla 1:

$$Q_1 = \frac{100 - C_W - C_A}{100} * Q_{cal}, \quad (1)$$

jossa

Q_1 on polttoaineen alempi lämpöarvo [MJ/kg]

C_W on polttoaineen kosteuspitoisuus [%]

C_A on polttoaineen tuhkapitoisuus [%]

Q_{cal} on kuivan polttoaineen kalorinen (ylempi) lämpöarvo [MJ/kg].

2.2.2 Ruo'on tuhkan ominaisuudet

Talviruo'on tuhkapitoisuus on noin 2–4 % pienempi kuin kesäruo'on, mutta tuhkissa on huomattavia eroja paitsi määrässä, myös ominaisuuksissa. Ruokojen kesäaikaan sisältämien ravinteiden ja mineraalien on havaittu merkittävästi alentavan tuhkan sulamislämpötilaa, mikä puolestaan myös rajoittaa ravinteikkaan ruo'on kapasiteettia toimia hyvänä polttoaineena. Kesällä niitetyn ruo'on tuhka alkaa menettämään muotoaan 600–700 °C lämpötiloissa, ja 1 000–1 100 °C lämpötiloissa tuhkasta tuli kokonaan juoksevaa. Talvella niitetyn ruo'on tuhka sen sijaan alkaa menettämään muotoaan 800–1 000 °C lämpötiloissa, mutta sitä voitiin lämmittää 1 350 °C lämpötilaan ilman, että se muuttui kokonaan juoksevaksi (Kask 2007).

Ruokojen suuren tuhkapitoisuuden, ja kesäruo'on alhaisen sulamispisteen kannalta ruo'ot soveltuvat polttolaitoskäytössä parhaiten pienehköillä seossuhteilla poltettaviksi tukipolttoaineiksi, ja sitä paremmin mitä lähempänä talvea se on niitetty.

3 Ruo'on tuotanto

Tutkimuksessa käytetty ruokomateriaali on niitetty Taivassalon Rantalanlahdelta, noin 6,5 hehtaarin alueelta. Rantalanlahti kuuluu noin puolentoista kilometrin päässä sijaitsevan Kolkanaukon Natura 2000-alueeseen (Kuva 3).

3.1 Niitto

Ruokojen niiton toteutti hankkeen kilpailutuksen voittanut kankaanpääläinen Starament Oy. Ruo'ot niitettiin käyttäen kahta dieselkäyttöistä Prinoth-rinnekonetta (Kuva 2). Koneisiin on tehty muutoksia muun muassa teloihin sekä hydraulikan jäähdytysjärjestelmään, jotta ne olisivat soveltuvia kesäkäyttöön ja epätasaiselle maastolle. Niitto tapahtui niittokoneen keulaan kiinnitetyllä kaksoissilppurilla, joka linkosi silputun ruokoaineksen vierellä kulkevan kuormakoneen peräkärriin (Starck 2023).



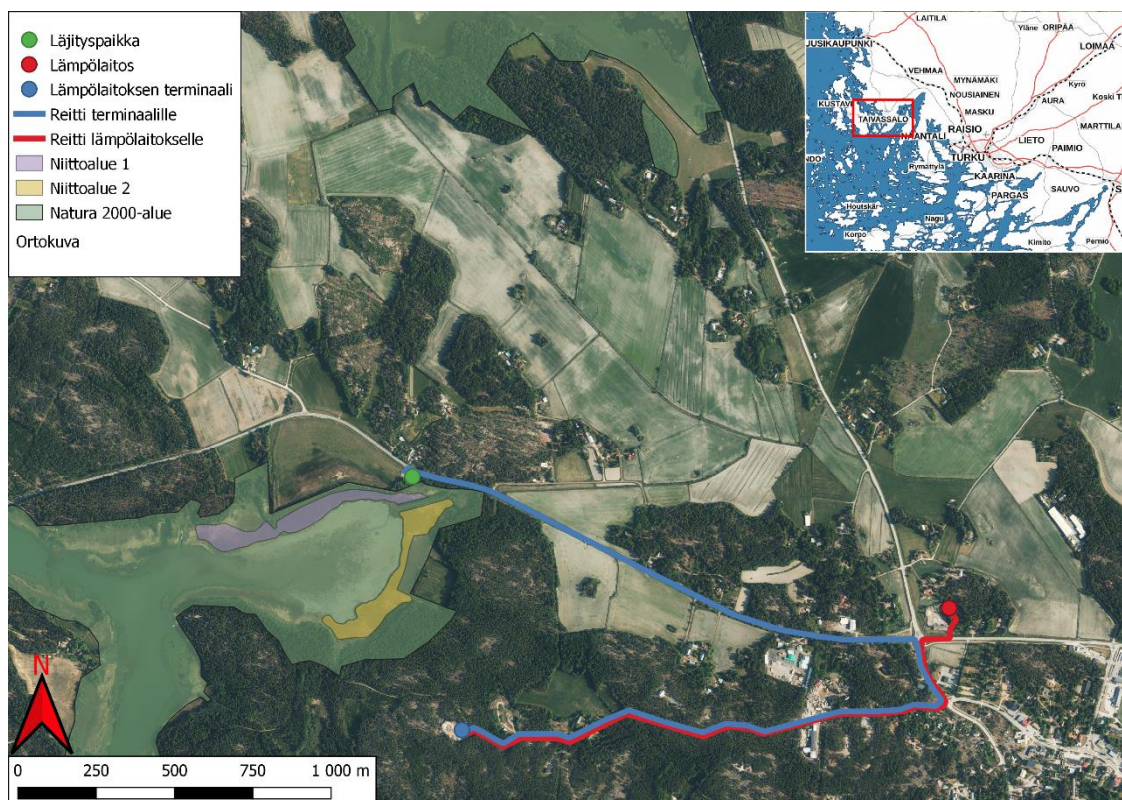
Kuva 2. Niittokoneisto Rantalanlahdella.

Ruo'ot niitettiin Rantalanlahdella kahtena eri ajankohtana, sillä alueen keskellä sijaitsi ruovikon peittoon jäänyt lahteen laskeva valtaoja. Ojan odottamattoman suuren leveyden takia niittokoneisto ei kyennyt ylittämään sitä, ja ojan ylitystä varten tilattiin yhteistyössä maanomistajan kanssa siihen asennettava rumpuputki, joka toimi siltana niittokoneistolle. Huonojen sääolosuhteiden aiheuttaman tulvimisen vuoksi rumpua ei voitu asentaa välittömästi, joten niittourakka jäi lahden ensimmäisen puolen niiton jälkeen tauolle noin viiden viikon ajaksi.

Alueen ensimmäisen puoliskon pinta-ala oli noin 3,5 hehtaaria ja se niitettiin 27.–28.9. Toisen puoliskon pinta-ala oli noin 3 hehtaaria ja se niitettiin 6.–8.11. Ruokosilppua tuotettiin ensimmäiseltä puoliskolta arviolta 260 m³ ja toiselta puoliskolta 230 m³, yhteensä siis noin 490 m³ ruokosilppua kahdeksan hehtaarin alueelta. Tuotto oli keskimäärin 75,38 m³/ha.

3.2 Logistiikka

Ruokosilpun läjityspaikkana toimi Rantalanlahden ja Kustavintien välissä olevan lintutornin parkkipaikan vieressä oleva peltoaukea. Pelto oli läjitystarkoitukseen ihanteellinen, sillä se oli suurin piirtein niitettävän alueen keskellä, sen välittömässä läheisyydessä oleva parkkipaikka tarjosi otolliset lastausolosuhteet ruokokuljetuksen hoitaneelle kuorma-autolle, ja se sijaitsi suhteellisen lyhyen välimatkan päässä lämpölaitoksen terminaalista (Kuva 3). Lisäksi läjitysalueelle tuodaan myöhemmällä ajankohdalla karjaa laiduntamaan, minkä vuoksi ruo'on siirtämisen jälkeen pellolle jääneet ruokosilpun jäänteet eivät tuottaneet haittaa maanomistajalle.



Kuva 3. Ruokomassan tuotanto- ja logistiikkaketju kartalla. (Ilmakuva: Maanmittauslaitos, avoin WMTS-rajapinta, ortokuva, haettu 10/2023)

Läjitysalueelta lämpölaitoksen oma kuljetusurakoitsija siirsi ruokosilpun kuorma-autolla lämpölaitoksen terminaaliin varastoitavaksi. Terminaali sijaitsi noin 3,6 kilometrin päässä läjityspaikalta, ja se toimii lämpölaitoksen polttoainevarastona pidemmällä aikavälillä, sillä itse lämpölaitoksen tilat eivät riitä suurien polttoainemäärien jatkuvaan varastointiin. Terminaalilta on matkaa lämpölaitokselle tasan kaksi kilometriä, ja polttoainetta toimitetaan sieltä lämpölaitokselle osana laitoksen normaalia toimintaa polttoaineen kulutuksen mukaisesti, joten ruokosilpun kuljetus ei terminaaliin päästyään tuota laitokselle merkittäviä lisäkuluja.

4 Polttokokeet

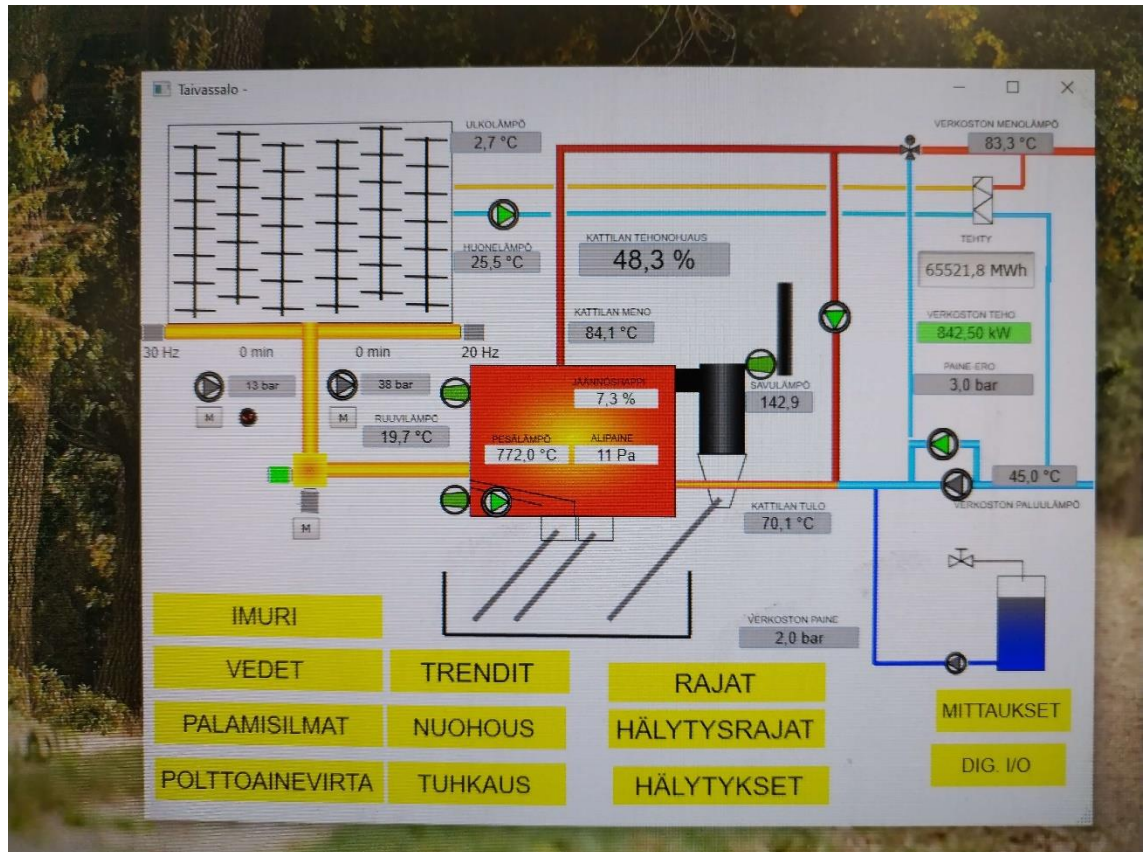
4.1 Taivassalon lämpölaitos

Taivassalon aluelämpölaitos on Taivassalon keskustassa sijaitseva biopolttoaineella toimiva kaukolämpölaitos. Laitos tuottaa kaukolämpöä useille lähialueella sijaitseville julkisille ja yksityisille rakennuksille, kuten liikuntahallille, koululle sekä kerros- ja omakotitaloille.

4.1.1 Laitoksen tilat

Lämpölaitoksen tilukset koostuvat kahdesta tontista: itse lämpökeskuksen alueesta sekä terminaalista. Terminaalilta polttoainetta toimitetaan tarpeen mukaan lämpölaitokselle kuorma-autolla. Suurin osa laitoksen kuluttamasta puuhakkeesta tulee kuitenkin suoraan metsistä laitokselle ilman ylimääräisiä välivaiheita tai varastointia.

Itse laitosrakennus jakautuu kahteen osaan: polttoainevarastoon ja kattilahuoneeseen. Polttoainevarastossa on kuusi tankopurkainta noin 70 m² alalla, jotka kuljettavat polttoaineen kohti varaston päädyssä olevaa kourua. Kourussa olevat kokoojaruuvit siirtävät polttoaineet kourun keskelle, josta nostoruuvi kuljettaa sitä varaston puolelta kattilahuoneeseen. Nostoruuvi tiputtaa polttoaineen risteyssuppiloon, josta pesäruuvi kuljettaa polttoaineet arinaan.



Kuva 4. Lämpölaitoksen ohjauspaneelin käyttöliittymä.

Laitoksen komponentit ovat visualisoituna sen ohjauspaneelin käyttöliittymässä, jossa vasemmalla ylhäällä on kuvattuna tankopurkaimet, joiden alla olevat keltaiset suorakulmiot kuvailevat ruuvikuljettimia (Kuva 4).

4.1.2 Polttokattila

Laitoksessa on pääkattila, ja varakattila. Pääkattilana toimii nimellistehoaltaan 1,2 MW, biopolttoaineille suunniteltu Calortec BIO-4 lämminvesikattila. Kattila on niin sanottu kolmivetoinen yläpaloarinakattila. Sen toiminta perustuu siihen, että arinan pohjalla olevat liikkuvat portaat levittävät pesäruuvien syöttämän polttoaineen tasaiseksi pediksi. Pedin alta arinaportaiden välistä syötetty ensiöilma sekä arinan kuumuus saavat polttoaineen kaasuuntumaan. Kaasumainen polttoaine nousee arinan yläosaan, jossa se reagoi toisiöllän mukana syötetyn hapen kanssa, muodostaen itse palamistapahtuman.

Palamisessa syntynyt lämpö siirtyy palokaasujen mukana kattilan konvektio-osaan, jossa kaasut kulkevat veden ympäröimissä putkissa, luovuttaen lämpöenergiansa putkien kautta kattilan veteen.

Laitoksen varakattila on 1,1 MW öljykattila, joka käynnistyy automaattisesti, jos pääkattila ei syystä tai toisesta kykene tuottamaan tarpeeksi tehoa, esimerkiksi häiriötilanteiden tai huoltotöiden aikana.

4.1.3 Laitoksen ohjausjärjestelmä

Laitoksen tehoa ohjataan automaattisesti kattilasta kaukolämpöverkkoon syötetyn veden lämpötilan perusteella. Lämpötilan asetusarvo on normaalisti 84,0 °C, ja lämpötilan säätökaista on kolme astetta asetusarvon kummallekin puolelle. Laitoksen automatiikka pyrkii pitämään lämpötilan jatkuvasti säätökaistan sisällä asetusarvosta säätämällä laitoksen tehonohjausprosenttia. Kattilan menoveden lämpötilan ollessa tasan 84 °C on tehonohjaus 50 %. Lämpötilan laskiessa tehonohjaus nousee-, ja lämpötilan noustessa tehonohjaus laskee suhteessa säätökaistan leveyteen.

Tehonohjausprosentti määrittelee pesäruuvien pyörimisnopeuden. Polttoaineen syöttönopeutta säätämällä kattilan lämpötilaa voidaan nostaa tai laskea laitoksen hetkellistä tehoa syöttöveden lämpötilan pitämiseksi halutulla tasolla. Tehonohjausprosentti ohjaa polttoaineen syötön nopeuden myötä myös laitoksen ensiöilman syöttöä, tarkoituksena pitää palamisilman määrä optimoituna syötetyn polttoaineen määrään. Arinan toisioilman syöttö määräytyy savukaasuista lambda-anturilla mitatun jäännöshappipitoisuuden mukaan.

4.1.4 Tuhkan keräys

Lämpölaitoksen tuottama tuhka kerätään polttoprosessin aikana kahdesta eri kohdasta: pääosa tuhkasta kerääntyy palamisen yhteydessä tulipesän alle tuhkalaatikkoon, josta se kulkeutuu ruuvikuljettimella laitoksen takana olevaan säiliöön. Kattilan yhteydessä on syklonierotin, joka kerää talteen savukaasuun

jääneet hienot tuhkapartikkelit. Savukaasuista kerätty tuhka kerääntyy laitoksen takana olevaan erilliseen säiliöön. Hienoa tuhkaa kertyy normaalissa käytössä arviolta noin 10 litraa viikossa, ja säiliö tyhjenetään säännöllisesti karkean tuhkan sekaan. Karkean tuhkan säiliö tyhjenetään 1–2 kertaa vuodessa.

Puuhaketta polttaessa karkean tuhkan koostumus on verrattain heterogeenistä, ja se sisältää vaihtelevin määrin sulaneen tuhkan muodostamia kiviä.

4.2 Polttoaineiden ominaisuuksien mittaus

4.2.1 Työn tarkoitus ja periaatteet

Polttokokeiden tulosten analysointia varten selvitettiin kokeissa käytetyistä järviruo'oista ja puuhakkeesta seuraavat fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet:

- 1 Pituushajonta (vain ruoko)
- 2 Kosteuspitoisuus
- 3 Tilavuuspaino
- 4 Tehollinen lämpöarvo, eli energiasisältö
- 5 Tuhkapitoisuus

Työn osana seurattiin myös lämpölaitoksen terminaaliin varastoidun ruokosilpun kosteuden muutosta viikoittain polttokokeiden aloituksen jälkeen.

Ruokosilpun pituushajonnan selvittämisessä hyödynnettiin ruokosilpusta otettua satunnaisotantaa, jossa jokaisen yli 1,0 senttimetrin pituuden ylittävän kappaleen pituus mitattiin ja kirjattiin ylös.

Ruo'on ja puuhakkeen kosteussisältö määritettiin käyttäen SFS-EN 13040-standardiin perustuvaa, AMK:n ruokohankkeissa vakiintunutta menetelmää, jossa tunnettu määrä tuoretta biomassaa punnitaan ja kuivataan, jonka jälkeen aineksen kosteussisältö määritetään vertaamalla sen tuorepainoa ja kuivapainoa.

Näytteiden tilavuuspaino määritettiin mittaamalla näytteiden tilavuus tunnetussa astiassa, jonka jälkeen näytteet punnittiin.

Ruokosilpun ja puuhakkeen energiasisältö, eli tehollinen lämpöarvo määritettiin pommikalorimetrin avulla polttamalla tunnettu määrä näytteistä tehtyä homogeenista jauhetta täydellisesti veden ympäröimässä hajotusastiassa, eli ”pommissa”. Energiasisältö määritettiin mittaamalla veden lämpötilaa palamisen aikana ja sen jälkeen, jotta saadaan selville palamisen veteen luovuttama kokonaisenergiamäärä, jonka avulla saadaan poltetun aineen keskimääräinen energiasisältö.

Ruokosilpun ja puuhakkeen tuhkapitoisuudet määritettiin polttamalla tunnettu määrä kumpaakin näytettä hitaasti tuhkaksi muhveliuuniin laitetuissa upokkaissa, ja mittaamalla upokkaiden massat ennen- ja jälkeen polttamisen.

4.2.2 Välineet ja laitteet

Mittaukset ja kokeet suoritettiin Turun ammattikorkeakoulun Lemminkäisenkadun kampuksen laboratorioissa. Töissä käytetty välineistö on listattuna taulukossa 1.

Taulukko 1. Laboratorioissa käytetyt välineet ja laitteet.

Väline	Laitenumero	Työ, jossa käytetty
Rullamitta		1
Uunipelti		1,2
Uuni	Kem 5411	2
Vaaka	Bio 1704	2,3
Lämpömittari	Bio 1673	3
10 l muoviämpäri		3
Leikkaava mylly	Kem 2226	4
Tablettipuristin	Bio 1568	4
Vaaka	Bio 1702	4,5
Tarkkuusvaaka	Bio 5079	4,5
Happipommikalorimetri	Kem 2200	4
Posliiniupokas		5
Muhveliuuni	Bio 5102	5

4.2.3 Työturvallisuus ja haitalliset aineet

Työturvallisuus huomioitiin työn aikana kiinnittämällä erityistä huomiota laboratoriotilojen ohjesääntöihin. Laboratorioissa työskenneltiin vain Turun ammattikorkeakoulun henkilökuntaan kuuluvan valvojan kanssa sovitusti. Laboratoriotiloissa pidettiin päällä aina vaadittuja suojarusteita. Töiden aikana ei käsitelty vaarallisia tai haitallisia kemikaaleja tai reagensseja. Töiden

päätyttyä käytetyt työtilat siivottiin tarkasti ja laboratoriotilojen käytöstä täytettiin kunkin laboratoriotilan sääntöjen mukaiset ilmoitukset.

4.2.4 Töiden suoritus

Järviruokosilpun pituushajonta

Ruokonäytteestä otettiin satunnainen koeotanta silppua, josta yksitellen mitattiin rullamittaa apuna käyttäen jokaisen palasen pituus. Tulokset kirjattiin yksitellen Excel-taulukkoon, jonka avulla laskettiin eri pituuksien osuudet otannasta.

Mittauksessa huomioitiin vain yli 1,0 senttimetrin kokoiset ja sitä suuremmat palaset. Tätä hienomman silpun osuus ruokomassasta oli kokonaisuutta arvioiden vähäinen, ja sen mittaaminen ei ollut tarkoituksenmukaista, sillä mittauksen tarkoitus oli varmentaa silpun sopivuus mittojensa puolesta lämpölaitoksen ruuvikuljettimiin.

Kosteuspitoisuus

Uuni asetettiin lämpiämään hieman yli 100 °C lämpötilaan. Uunin lämmitessä kaksi metallista uunipeltiä punnittiin ja niiden omapainot kirjattiin ylös.

Polttoainenäytteet kaadettiin pelleille ja niiden tuorepainot punnittiin ja kirjattiin ylös. Uunin lämmitessä noin 108 °C lämpötilaan näytteet laitettiin sisään noin vuorokaudeksi. Uunista poistamisen jälkeen näytteet jälleen punnittiin, jolloin kosteussisältö saatiin laskettua kaavalla 2:

$$W_m = \frac{(m_W - m_D)}{(m_W - m_T)} * 100 \%, \quad (2)$$

missä

W_m on näytteen kosteuspitoisuus prosentteina

m_W on näytteen ja pellin yhteenlaskettu massa [g] ennen kuivatusta

m_D on näytteen ja pellin yhteenlaskettu massa [g] kuivatuksen jälkeen

m_T on uunipellin massa [g].

Tiheys

Tiheyden määrittämistä varten laskettiin näytteiden kuiva-aineiden tiheydet. Kuiva-aineen tiheyttä käyttäen voidaan määrittää saman materiaalin tiheys eri kosteuksilla huomioimalla kosteuspitoisuus laskuissa.

Mittausta varten käytettiin ämpäriä, jonka massa tunnetaan. Ämpäri täytettiin vedellä, jonka jälkeen ämpäri punnittiin ja veden pinnan kohdalle tehtiin kynällä merkintä. Veden lämpötilaksi mitattiin 12 °C. Veden massan avulla määritettiin merkinnän alapuolelle jäävä tilavuus käyttäen kylmän veden likiarvoista tiheyttä 1000 kg/m³. Ämpäri tyhjätettiin vedestä ja täytettiin näytteellä, jonka kosteus tunnetaan, ämpäriin tehtyyn merkintään asti, jonka jälkeen ämpäri jälleen punnittiin.

Kuiva-aineen tiheys määritettiin kaavalla 3:

$$\rho = \frac{m_W}{V} * \left(1 - \frac{W_m}{100}\right), \quad (3)$$

missä

ρ on aineen tiheys [kg/m³]

m_W on kostean aineen massa [kg]

V on näytteen tilavuus [m³]

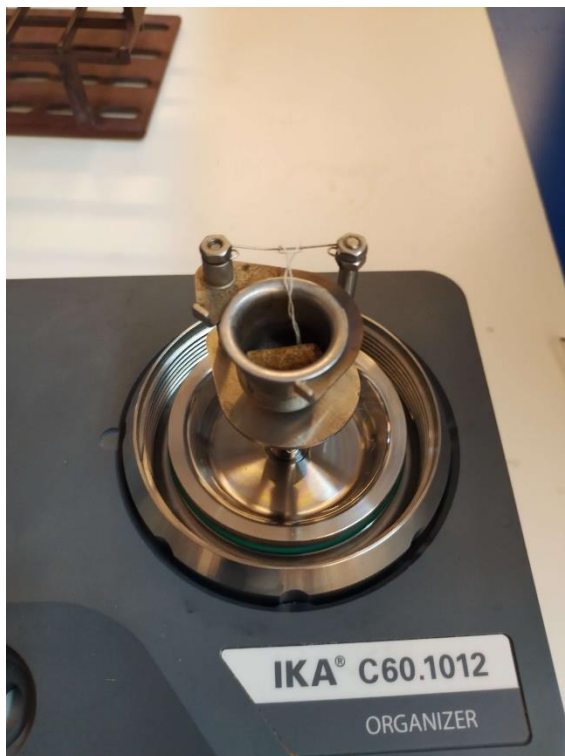
W_m on näytteen kosteuspitoisuus [%].

Energiasisältö

Näytteiden energiasisältö määriteltiin mittaamalla niiden lämpöarvot happipommikalorimetrillä. Menetelmä perustuu siihen, että tunnettu määrä näytettä poltetaan täydellisesti ylihapettuneessa hajotusastiassa, jonka jälkeen lasketaan astiaa ympäröivän veden lämpötilanmuutos.

Ennen mittauksia kuivatut puusilppu- ja ruokonäytteet jalostettiin hajotusastiaan sopiviksi tableteiksi. Näytteet jauhettiin ensin hienoiksi, tasalaatuisiksi jauheiksi leikkaavalla myllyllä 2 mm seulalla. Polttoainejauhetta mitattiin tablettipuristimen muottiin noin 400–500 mg. Puutabletit puristettiin kohdistamalla niihin 5 000 kg paine 30 sekunnin ajan, ja ruokotabletit puristettiin 10 000 kg paineessa 30 sekunnin ajan. Puristamisen jälkeen jokainen tabletti punnittiin tarkkuusvaa'alla, joka ilmaisee punnittavan massan 0.1 mg tarkkuudella.

Ennen kuin mittauksia tehtiin, kalorimetrillä suoritettiin yksi esilämmityspolttotunnetulla puupelletillä. Hajotusastian pohjalle mitattiin 5 ml laboratoriovettä lämmönjohtimeksi. Pelletit asetettiin hajotusastian polttoupokkaaseen siten, että se makaa pommin hehkulankaan solmitun sytytyslangan päällä (Kuva 5). Testeissä käytettiin 50 joulen energiasisällön omaavaa puuvillaista sytytyslankaa, jonka laite huomioi mittauksissa automaattisesti.



Kuva 5. Esilämmityspelletti aseteltuna polttoupokkaaseen.

Mittauksia tehdessä kuivatusta ruo'osta ja puusta tehtyjen tablettien todettiin palavan niin aggressiiviseksi, että palamisen alkaessa tabletin alapuolelta energian vapautuminen on niin voimakasta, että tabletti lennähtää ulos upokkaasta hajotusastian pohjalle ennen kuin se ehtii palaa loppuun (Kuva 6).



Kuva 6. Tabletin palaminen on keskeytynyt sen laskeutuessa astian pohjalla olevaan veteen.

Testejä koetettiin suorittaa asettamalla sytytyslanka tabletin yhteyteen siten, että sytytyslangan toinen pää asetettiin tabletin alle, ja toinen pää tabletin päälle siten, että palaminen upokkaassa alkaisi tabletin molemmilta puolilta. Tällä tavalla saatiin kuitenkin vain yksi mittaustulos, jossa ruokotabletti paloi täydellisesti. Mainitsemisen arvoista on, että yhdessäkään kirjallisuuden lähteessä ei mainittu vastaavanlaisia haasteita vastaavanlaisia mittauksia suoritettaessa. Tämä johtuu todennäköisimmin siitä, että testit suoritettiin täysin kuivalla polttoaineella, eikä esimerkiksi hallitusti kostutetulla tai tunnetun kosteuden polttoaineilla.

Kokeet toistettiin myöhemmin siten, että hajotusastian pohjalle ei laitettu ollenkaan vettä. Tällä tavalla näytteet pääsivät palamaan loppuun siitä huolimatta, että ne lennähtivät pois upokkaasta. Veden poiston vaikutus mittaustarkkuuteen oli kokonaisuudessa vain vähäinen. Veden tehtävä astian pohjalla on johtaa lämpö astian sisäilmasta sen kuoreen, joten veden poistaminen näkyi lähinnä siinä, että jokainen mittaus kesti useita minuutteja kauemmin. Näiden testien aikana molemmista polttoaineista saatiin mittaustulokset, jotka ovat taulukoituna liitteessä 1.

Tuhkapitoisuus

Näytteiden tuhkapitoisuudet määritettiin käyttämällä samoja jauhettuja näytteitä, joista lämpöarvot määritettiin. Työssä käytettiin neljää eri posliiniupokasta, jotka numeroitiin yhdestä neljään. Upokkaat punnittiin tarkkuusvaa'alla 0.1 milligramman tarkkuudella, jonka jälkeen upokkaat 1 ja 2 täytettiin ruokojauheella, upokkaat 3 ja 4 puuhakejauheella. Upokkaat punnittiin tämän jälkeen uudelleen.

Upokkaat asetettiin muhveliuuniin, joka oli esilämmitetty 300 °C. Uunin lämpötilaa nostettiin 100 °C portaissa puolen tunnin välein aina 900 °C asti, kunnes ne olivat kokonaan palaneet. Porrastuksen syynä oli lämpöarvomittauksien aikana saatu kokemus, jonka mukaan jauhetut kuivat näytteet palavat herkästi ja hallitsemattomasti, mikä olisi johtanut tuhkien pöllähtämiseen uunin sisällä. Polttamalla näytteet hallitusti tuhka saatiin pysymään kokonaan upokkaiden sisällä.

Kun näytteet olivat kokonaan palaneet ja tuhkat olivat kerääntyneet upokkaiden pohjalle, ne poistettiin uunista ja punnittiin. Saadusta tuloksesta vähennettiin upokkaiden tyhjäpaino, jolloin tulokseksi saatiin näytteen sisältämän tuhkan massa, jota vertailemalla näytteen alkuperäiseen massaansa saatiin määritettyä tuhkapitoisuus.

4.2.5 Virhetarkastelu

Pituushajonta

Mittaukset suoritettiin käsin käyttäen rullamittaa, jonka tarkkuus oli 1 mm, joten mittaustuloksissa saattaa olla epätarkkuuksia. Lisäksi tulokset antavat vääristetyn kuvan silpun koostumuksesta, sillä alle 1,0 senttimetrin pituiset palat jätettiin mittaamatta. Näin ollen tuloksien perusteella ei voi tehdä tarkkoja johtopäätöksiä silpun tiheydestä tai tarkasta koostumuksesta. Mittauksien perusteella voidaan ainoastaan päätellä silpun soveltuvuutta laitoksen ruuvikuljettimiin.

Kosteuspitoisuus

Mittauksessa sovellettu standardi SFS-EN 13040 on tarkoitettu maanparannusaineille ja kasvualustoille, joten sen periaatteet soveltuvat työssä tehtyihin mittauksiin, vaikka ruokosilppu ja puuhake eivät ole täysin yhteensopivia standardissa tarkoitettuihin materiaaleihin.

Mitatut näytteet olivat massaltaan noin 200–300 g painoisia ja ne punnittiin vaa’alla, jonka tarkkuus oli 1 g. Standardin vaatima massa olisi ollut noin 50 g ja vaa’an tarkkuus 0,01 g. Näytteitä kuivattiin 106–108 °C lämmössä vähintään vuorokauden ajan, kun taas standardissa määritettiin, että lämpötilan olisi oltava tasan 103 °C ja näytteitä olisi kuivattava vain niin kauan, että sen massa ei enää muutu. Korkeamman lämpötilan ja pidemmän kuivausajan myötä on mahdollista, että veden lisäksi näytteistä haihtui veden lisäksi muitakin haihtuvia yhdisteitä, jolla voi olla pieni vaikutus näytteen kuivamassaan.

Näytemassan ollessa keskimäärin 5x vaadittua suurempi, ja käytetyn vaa’an ollessa 100x epätarkempi, mittausten suhteellinen virhe verrattuna standardin menetelmään on noin 16–25 %.

Tiheys

Tiheyden määrittelyssä käytettiin kaikista eniten visuaalisia mittausten menetelmiä ja likiarvoja. Käytetty ämpäri ja mitattu näytemäärä olivat todella pieniä verrattuna materiaalien todelliseen määrään, joten mittauksissa ei otettu huomioon esimerkiksi polttoaineiden painumista oman painonsa alla, eikä karkeat materiaalit välttämättä mahtuneet kunnolla "asettumaan" ämpäriin, jolloin mittaustulos voi vääristyä huomattavasti.

Veden tiheyden laskemiseen käytettiin veden tiheyden likiarvoa 1 kg/dm^3 , mutta todellisuudessa arvo on $12 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa noin $0,99955 \text{ kg/dm}^3$, jolloin tilavuuden määrittämisen suhteellinen virhe on $0,045 \%$. Tämä on kuitenkin erittäin vähäinen verrattuna polttoaineiden karkean ja harvan koostumuksen tuottamaan vääristykseen niiden tilavuudessa.

Energiasisältö

Testien alkuperäisenä tavoitteena oli saada molemmista näytteistä vähintään kolme luotettavaa tulosta, jotta saataisiin mahdollisimman tarkasti määriteltyä näytteiden keskimääräiset lämpöarvot. Tablettien voimakkaan palamisen ja kalorimetrin tuottamien haasteiden seurauksena kuitenkin molemmista näytteistä ehdittiin saamaan kahden päivän mittauksen aikana vain yhden luotettavat mittaustulokset.

Uusituissa kokeissa saadut tulokset järviruo'osta ovat kaikki lähes identtisiä keskenään, mutta ne ovat noin 200 J/g pienempiä kuin ensimmäisissä testeissä saavutetussa täydellisessä palamisessa. Tämä saattaa osin selittyä sillä, että palamisen aikana hajotusastian sisälle kertyi palamistuotteena pieniä määriä kosteutta, joka esti näytteen palamisen täydellisesti kokonaisuudessaan, mikä näkyi kokeiden jälkeen hiilijäminä astian pohjalla (Kuva 7).



Kuva 7. Hiiltynyttä materiaalia hajotusastian pohjalla.

Toisaalta samanlaista hiilijälkien muodostumista huomattiin myös puuhakkeen mittauksissa, mutta uusituissa kokeissa puuhakkeesta saadut tulokset olivat noin 2 000 J/g suuremmat, kuin mitä ne olivat ensimmäisessä mittauksessa saadussa tuloksessa.

Tuhkapitoisuus

Tuhkapitoisuuden mittaukset toteutettiin suhteellisen pienillä näytteillä. Upokkaiden ruokojauheisältö oli kokonaisuudessaan noin 8 grammaa, ja puuhakejauheisältö noin 10 grammaa. Ideaalisti kuhunkin upokkaaseen olisi sijoitettu vähintään 10 g materiaalia mittaustulosten tarkkuuden parantamiseksi mutta jauheiden koostumus oli niin harvaa, että upokkaisiin ei saatu mahtumaan enempää. Jauheiden puristaminen tableteiksi ei ollut vaihtoehtona, sillä laboratorion tablettipuristimella saatiin valmistettua yksitellen keskimäärin 0,5 g painoisia tabletteja, eikä aika riittänyt tarvittavan määrän valmistamiseen.

4.3 Tuhkan alkuainepitoisuudet

Laboratoriossa ja lämpölaitoksella tuotetulle tuhkalte teetettiin alkuainekoostumusanalyysit Åbo Akademilla osana Åbo Akademin ja Turun ammattikorkeakoulun yhteistä Biodemo-hanketta.

Analyysit toteutettiin SEM-EDS-menetelmällä, joka hyödyntää röntgenspektroskopiaa ja elektronimikroskopiaa. Alkuaineiden määrät laskettiin oksidipitoisuuksina. Analyysien tulokset ovat taulukoituna liitteessä 2.

4.4 Pienen kaavan koepoltot

Pienen mittakaavan koepolttoja toteutettiin yhteensä kolme kappaletta eri ruokoseoksilla. Koe-erät olivat 0,5 m³ kokoisia. Niistä yksi oli kontrollierä, joka oli 100 % puuhaketta. Kaksi muuta erää sisälsivät noin 7- ja 10 % tilavuudestaan järviruokohaketta.

Koepoltot toteutettiin Moisanon opinnäytetyössä kuvailtua menetelmää mahdollisimman tarkasti mukailien tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi. Menetelmän mukaisesti varaston ja kuljettimien automatiikka pysäytettiin manuaalisesti, jolloin ainoastaan pesäruuvi pyöri tehonohjauksen mukaisesti. Tilavuudeltaan tunnettu määrä polttoainetta syötettiin käsin pesäruuville risteysuppilossa olevan huoltoluukun kautta. Koe jatkui, kunnes polttoaine loppui. Syötetyn polttoaineen annettiin siirtyä arinaan, minkä jälkeen automaattinen syöttö käynnistettiin jälleen.

Kokeiden aikana laitoksen toimintaa säättävästä tietokoneesta otettiin viiden minuutin välein ylös sen tuottamat mittausarvot (Taulukko 2).

Taulukko 2. Koepoltoissa mitatut arvot.

Ulkolämpötila	Sisälämpötila	Verkoston menolämpötila
Verkoston paluulämpötila	Kattilan menolämpötila	Kattilan paluulämpötila
Jäännöshappiprosentti	Savukaasun lämpötila	Tulipesän lämpötila
Tulipesän alipaine	Kaukolämpöverkoston veden menopaine	Kaukolämpöverkoston veden paluupaine
Verkoston teho	Verkostoon syötetty teho	Tehonohjausprosentti

4.4.1 Polttoaineiden ominaisuudet

Taulukko 3 on koottuna testeissä polttoaineille mitatut ominaisuudet.

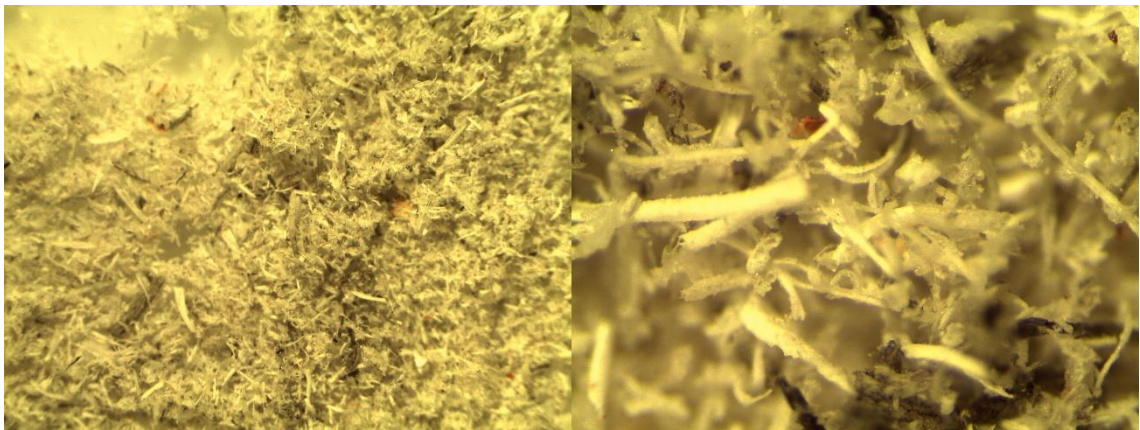
Taulukko 3. Polttoaineille testeissä mitatut ominaisuudet.

Mitatut arvot				
Polttoaine	Kosteus	Ylempi lämpöarvo	Tiheys	Tuhkapitoisuus
Puuhake	33,4 %	19,2 MJ/kg	260 kg/m ³	1,02 %
Ruokosilppu	44,7 %	17,7 MJ/kg	40,6 kg/m ³	4,61 %
Johdannaisarvot				
	Alempi lämpöarvo mitatussa kosteudessa	Energiatiheys (m)	Energiatiheys (V)	
Puuhake	12,657 MJ/kg	3,510 MWh/t	0,91 MWh/m ³	
Ruokosilppu	9,337 MJ/kg	2,594 MWh/t	0,11 MWh/m ³	

Ruokosilpun mitattu pituus vaihteli välillä 1,0–35,5 senttimetriä, ja otannan keskipituus oli noin 6,27 senttimetriä. Mitatusta silpusta yli 90 % osuus oli pituudeltaan alle 12,7 senttimetriä, joten mittojensa puolesta koneiden tuottama silppu arvioitiin kokonaisuudessaan laitoksen ruuvikuljettimiin soveltuvaksi.

Laboratoriotesteissä ruo'on tiheydeksi määritettiin $40,6 \text{ kg/m}^3$, mutta sama arvo ei päde suuremmalla mittakaavalla. Esimerkiksi saman hankkeen aiemmissa – myös Staramentin niittämässä – niittokohteissa käytetty kuljetusurakoitsija mittasi siirtäneensä 370 m^3 ruokosilppua, jonka massaksi mitattiin 60,5 tonnia. Tällä mittakaavalla ruo'on tiheys olisi yli nelinkertainen: $163,5 \text{ kg/m}^3$. Tällöin myös ruo'on energiatiheys olisi samassa suhteessa suurempi.

Ruo'on tuhkapitoisuuden mitattiin olevan lähes 5 kertaa suurempi kuin puun. Tuhkia tutkittiin mikroskoopilla tutkimuksen jälkeen sulamisen merkkien etsimiseksi. Puun tuhka oli väriltään tumman harmaata ja koostumukseltaan erittäin hienoa jauhetta. Ruokotuhka puolestaan oli väriltään pääosin hyvin vaalean harmaata ja koostumukseltaan hieman karkeampaa. Mikroskoopilla tarkkaillessa ruokotuhkan rakenne osoittautui kiteiseksi (Kuva 8).



Kuva 8. Mikroskooppikuvia järviruokotuhkasta.

Kidemäinen rakenne viittaa korkeaan silikaattipitoisuuteen. Piin (Si) sulamispiste on noin $1\,400 \text{ °C}$, joten korkeampi osuus silikaatteja nostaa koko tuhkan sulamispistettä merkittävästi, mutta voi muodostaa kattilakiveä pidemmällä aikavälillä.

4.4.2 Koe-erät

Koepolttoerät valmistettiin visuaalisella mittaustarkeudella käyttäen 90 litran muovilaatikkoa, 10 litran ämpäriä ja 200 litran jätösäkkejä.

10 % ruokoseos valmistettiin täyttämällä 90 litran laatikko täyteen puuhaketta, ja ämpäri täyteen ruokosilppua. Nämä sekoitettiin yhteen jätösäkissä, johon saatiin näin 100 litraa polttoaineseosta. Sama prosessi toistettiin neljään muuhun jätösäkkiin, jolloin saatiin 500 litran koe-erä. Erän teholliseksi lämpöarvoksi laskettiin noin 0,415 MWh.

Toinen seoserä valmistettiin samalla tavalla siten, että ämpäri täytettiin ensin vähän yli puolilleen ruo'olla, minkä jälkeen ämpäri täytettiin loppuun puuhakkeella. Ämpäriin ja laatikon sisällöt sekoitettiin jätösäkkeihin, jolloin polttoaineen ruokopitoisuus jäi 6–7 % tasolle. Erän tehollinen energiasisältö oli noin 0,429 MWh.

Kontrollierä valmistettiin samalla menetelmällä, mutta sekä laatikko- että ämpäri täytettiin puuhakkeella. Sisällöt tyhjennettiin jätösäkkeihin, jolloin koe-erä koostui 100 % puuhakkeesta. Kontrollierän tehollinen energiasisältö oli noin 0,455 MWh.

Koe-erien seoksista saatiin hyvin tasalaatuisia. Tähän on vaikuttanut usea tekijä: erät olivat verrattain pieniä ja ne valmistettiin käsin, jolloin sekoittaminen oli helpompaa. Erät myös sekoitettiin laatikossa, josta ne kaadettiin jätösäkkeihin, ja polton aikana jätösäkeistä ensin takaisin laatikkoon polttoaineen syötön helpottamiseksi. Astiasta toiseen kaataminen ja liikuttelu edesauttoi huomattavasti erien tasalaatuistumista.

4.4.3 Koepolttojen tulokset

Koepolttojen tuloksia arvioitiin vertaamalla koe-erien arvioitua energiasisältöä kokeen aikana verkostoon syötettyyn tehoon, laskemalla polttojen hyötysuhteet kaavalla 4:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100, \quad (4)$$

missä

η on hyötysuhde [%]

P_{out} on verkostoon syötetty energia [MWh]

P_{in} on polttoaineen sisältämä energia [MWh].

Tulokset ovat tiivistettynä taulukossa 4:

Taulukko 4. Koepolttojen tulokset.

Koe-erä	Kesto	P_{in}	P_{out}	η
Kontrolli	55 min	0,455 MWh	0,35 MWh	76,9 %
10 %	50 min	0,415 MWh	0,33 MWh	79,5 %
7 %	60 min	0,429 MWh	0,37 MWh	86,3 %

Tuloksien perusteella ruokojen lisääminen paransi huomattavasti palamisen hyötysuhdetta. Kontrollierä oli energiasisällöltään suurin, mutta verkostoon syötettyyn energiamäärään suhteutettuna siitä ei saatu yhtä paljon tehoa irti kuin ruokoseoksilla. Pienen mittakaavan kokeiden tulokset kuitenkin tukevat alkuperäistä teoriaa, sekä aiempien tutkimuksien tuloksia siitä, että hillitty määrä ruokoa polttoaineen seassa tehostaa palamista ja kasvattaa polttoprosessin hyötysuhdetta.

4.4.4 Koepolttojen virhetarkastelu

Lämpölaitoksen mittaristo seuraa energiantuotantoa 0,01 MWh tarkkuudella. Koe-erien energiasisällöt laskettiin 0,001 MWh tarkkuudella. Mittausten potentiaalinen virhemarginaali on siis noin 2,6 % / 0,5 m³. Virhemarginaali on skaalautuvuudeltaan huomattava huomioiden koe-erien suhteellisen pienet koot, joten kokeiden toistaminen suuremmilla koe-erillä olisi perusteltua. Tämän lisäksi poltosta syntyvä energia ei siirry verkostoon välittömästi kattilaan syötön

jälkeen, vaan pienellä viiveellä. Tätä seikkaa ei otettu koepoltoissa huomioon, mutta sen merkitys pienenee suuremmilla koepolttoerillä.

4.5 Suuren kaavan polttokokeet

Suuren mittakaavan polttokokeet toteutettiin pienen kaavan kokeiden jälkeen. Kokeiden aikana sekoitettiin laitoksen polttoainevarastoon puuhakkeeseen järviruokoa siten, että seossuhde on mahdollisimman lähellä kymmentä prosenttia. Kokeiden aikana seurattiin laitoksella mitattuja arvoja pidemmällä aikavälillä sekä ratkaistiin laitoksen automatiikkaan kohdistuneita haasteita.

4.5.1 Polttoaineseokset ja holvaantumisen ehkäisy

Polttoaineseokset valmistettiin paikan päällä laitoksella käyttäen kauhakuormaajaa. Laitokselle toimitettiin viikoittain ruokoa tarvittu määrä polttoainekuljetuksien yhteydessä, ja polttoaineet sekoitettiin keskenään.

Kokeiden alkaessa ruoko yritettiin sekoittaa mahdollisimman tasaisesti koko polttoainevaraston leveydeltä siten, että ruokoa syötetään tasaisesti jokaisen kiilan päältä. Kauhakuormaajalla ei kuitenkaan onnistuttu saamaan tarpeeksi tasaista seosta aikaan, jolloin ruokosilppua jäi merkittäviä määriä paakuiksi hakkeen seassa. Tämä aiheutti tankopurkaimen ja kokoojaruuvikourun väliseen syöttöaukkoon kostean ruo'on muodostaman holvimaisen tukoksen, eli ns. holvaantumista. Nämä tukokset pysäyttivät polttoaineen syötön laitoksella ja ne tuli avata käsin joka kerta kun niitä ilmaantui (Kuva 9).



Kuva 9. Ruokomassa on tukkinut kokoojaruuvien syöttöaukon.

Holvaantumista ehkäistiin ensisijaisesti ruo'on sijoittelua optimoimalla. Toimivaksi ratkaisuksi todettiin ruokosilpun sijoittaminen varastossa vain kahdelle kuudesta kuljetinkiilasta. Kapeammalle alalle sijoitettuna polttoaineseokset olivat huomattavasti helpompia valmistaa kuormaajalla. Sijoittamalla kahden kiilan päälle 1/3 polttoaineesta ruokoa saavutettiin arviolta noin 10–17 % polttoaineseos, jota laitteisto kykeni syöttämään pitkiä aikoja ilman tukkiutumista.

Ruo'on sijoittaminen vain varaston toiselle puolelle ei vaikuttanut merkittävästi kattilaan päätyneen polttoaineseoksen tasaisuuteen, sillä varaston kokoojaruuvit kuljettavat polttoaineet varaston keskikohtaan nostoruuville, joten polttoaineet sekoittuvat nostoruuviin päästyään tasaisesti (Kuva 10).



Kuva 10. Polttoaineseosta risteysuppilossa.

Vaihtoehtoinen ratkaisu tasaisen seoksen saavuttamiselle voisi hyvinkin olla polttoaineiden sekoittaminen jo ennen kuin ne saapuvat laitokselle, jolloin kuljetuksen ja siirtelyn aiheuttaman tärinän ja liikkeen seurauksena polttoaineet voivat sekoittua hyvinkin tasaisesti. Tälle ei kuitenkaan nähty tarvetta kokeiden aikana.

4.6 Kustannuslaskelmat

Urakoitsijan veloitus alueen niittämisestä ja keräämisestä oli 2000 euroa per hehtaari + arvonlisävero 24 %. Lopullinen niittoala oli 6,5 hehtaaria, joten niiton loppuhinnaksi muodostui arvonlisävero mukaan lukien 16 120 euroa. Ruo'on keräämisen ja läjittämisen osuus itse niiton hinnasta on 50 %, joten jotta ruokosilpun kerääminen olisi taloudellista, sen tuottaman rahallisen hyödyn tulisi kattaa keräys ja kuljetus. Kerätyn ruo'on kuljetus niittopaikalta terminaaliin

maksoi arviolta noin 1000 euroa, joten saavutetun hyödyn tulisi siis olla yli 9 060 euroa.

4.6.1 Hankkeen näkökulma

Polttokelpoista ruokoa tuotettiin yhteensä noin 490 m³, joten ruo'on hinnaksi muodostui kuljetus mukaan lukien 34,94 €/m³. Silputun ruo'on mitattu energiatiheys oli 0,11 MWh/m³, joten puhtaan ruokoenergian hinnaksi tuli 317,45 €/MWh.

Syksyllä ja talvella laitoksessa poltetaan yleensä pääosin tasalaatuista puuhaketta, josta on karsittu pois risuja ja muita energiatiheyttä laskevia epäpuhtauksia. Karsittu puuhake maksaa laitokselle tavallisesti noin 25 €/m³. Kesäisin polttoaineen kulutuksen ollessa vähäisempää laitoksella poltetaan karsimatonta materiaalia, joka maksaa noin 15 €/m³.

Tuotetun energian hinta voidaan laskea polttoaineiden hintojen summan suhteena tuotettuun energiaan kaavalla 5:

$$pr_E = \frac{(V_1 * pr_1) + (V_2 * pr_2)}{P_{out}}, \quad (5)$$

jossa

pr_E on energian hinta [€]

V_1 on puuhakkeen tilavuus [m³]

pr_1 on puuhakkeen hinta [€]

V_2 on ruo'on tilavuus [m³]

pr_2 on ruo'on hinta [€]

P_{out} on polttoaineista verkostoon saatu energia [MWh].

Esimerkiksi taulukon 4 mukaisen kontrollierän energian hinta 76,9 % hyötysuhteella oli yhteensä

$$\frac{(0,5 \text{ m}^3 * 25 \text{ €/m}^3)}{0,35 \text{ MWh}} = 35,72 \text{ €/MWh}$$

10 % koe-erän energian kokonaishinta 79,5 % hyötysuhteella oli

$$\frac{(0,45 \text{ m}^3 * 25 \text{ €/m}^3) + (0,05 \text{ m}^3 * 34,94 \text{ €/m}^3)}{0,33 \text{ MWh}} = 39,38 \text{ €/MWh}$$

7 % koe-erän energian kokonaishinta 86,3 % hyötysuhteella oli

$$\frac{(0,465 \text{ m}^3 * 25 \text{ €/m}^3) + (0,035 \text{ m}^3 * 34,94 \text{ €/m}^3)}{0,37 \text{ MWh}} = 34,72 \text{ €/MWh}$$

Lasketuista arvoista voidaan huomata, että vaikka 10 % seos paransi palamisen hyötysuhdetta, se on kuitenkin kokonaisuutena kalliimpaa kuin pelkän puuhakkeen polttaminen. 7 % koe-erän kohdalla kuitenkin hyötysuhde-ero oli niin merkittävä, että energian kokonaishinta laski noin 2,8 prosenttia, tai 1 €/MWh.

490 m³ ruokoa sekoittuu 7 % suhteella noin 6 500 kuutiometriin puuhaketta, jonka hankintahinta olisi noin 162 500 euroa. Tällöin saavutettu taloudellinen etu olisi vain noin 4 500 euroa, joka ei kata niiton, keräyksen ja kuljetuksen tuottamia kuluja. Pelkästään kulujen kattamiseksi taloudellisen edun tulisi tässä tilanteessa olla noin kaksi kertaa suurempi, eli noin 2 €/MWh.

10 % seoksella 490 m³ ruokoa sekoittuu noin 4 400 kuutiometriin puuhaketta, jonka hankintahinta on 110 000 euroa. Tällöin ruokojen polttaminen tuottaa taloudellista tappiota noin 11 300 euroa.

4.6.2 Lämpölaitoksen näkökulma

Taivassalon lämpölaitoksen oma osuus hankkeen rahoituksesta oli 6 000 euroa, minkä lisäksi laitos kustansi kuljetuksen, noin 1 000 euroa. Ruoko maksoi siis todellisuudessa itse laitokselle noin 14,28 €/m³, tai 129,87 €/MWh.

10 % seoksen hinta laitokselle on siis

$$\frac{(0,45 \text{ m}^3 * 25 \text{ €/m}^3) + (0,05 \text{ m}^3 * 14,28 \text{ €/m}^3)}{0,33 \text{ MWh}} = 36,25 \text{ €/MWh}$$

7 % seoksen hinta laitokselle on

$$\frac{(0,465 \text{ m}^3 * 25 \text{ €/m}^3) + (0,035 \text{ m}^3 * 14,28 \text{ €/m}^3)}{0,37 \text{ MWh}} = 32,77 \text{ €/MWh}$$

Jos siis 6500 m³ puuhaketta poltetaan sekoittaen siihen 490 m³ ruokoa, laitoksen näkökulmasta taloudellinen etu olisi 13 400 euroa.

10 % seoksella poltettuna koko määrän tuottama tappio laitokselle olisi noin 1650 euroa.

4.6.3 Tulevaisuudessa

Puuhakkeen hinta nousee hiljalleen vuosittain. Olettaen ruo'on hinnan pysyvän samana, voidaan tehdä spekulatiivisia laskelmia puuhakkeen eri hinnoilla. Laskelmat on tehty kaavan 4 mukaan

:

Taulukko 5. Kustannustehokkuuden muutos suhteessa puun hintaan.

HANKINTAHINNAT [€/m ³]		ENERGIAN HINTA [€/MWh]		
PUUHAKE	RUOKO	Hake	7 % seos	erotus
25,00 €	34,94 €	35,71 €	34,72 €	0,99 €
26,00 €	34,94 €	37,14 €	35,98 €	1,16 €
27,00 €	34,94 €	38,57 €	37,24 €	1,33 €
28,00 €	34,94 €	40,00 €	38,49 €	1,51 €
29,00 €	34,94 €	41,43 €	39,75 €	1,68 €
30,00 €	34,94 €	42,86 €	41,01 €	1,85 €
31,00 €	34,94 €	44,29 €	42,26 €	2,02 €
32,00 €	34,94 €	45,71 €	43,52 €	2,19 €
33,00 €	34,94 €	47,14 €	44,78 €	2,36 €
34,00 €	34,94 €	48,57 €	46,03 €	2,54 €
35,00 €	34,94 €	50,00 €	47,29 €	2,71 €
36,00 €	34,94 €	51,43 €	48,55 €	2,88 €
37,00 €	34,94 €	52,86 €	49,81 €	3,05 €
38,00 €	34,94 €	54,29 €	51,06 €	3,22 €
39,00 €	34,94 €	55,71 €	52,32 €	3,40 €
40,00 €	34,94 €	57,14 €	53,58 €	3,57 €

Ihanteellisimmalla löydetyllä seoksella polttaminen olisi siis taloudellisesti kannattavaa vasta tilanteessa, jossa puuhakkeen hankintahinta ylittää 31 €/m³.

10 % polttoaineseoksella mitatulla hyötysuhteella ei saavutettu vastaavanlaista taloudellista hyötyä ennen kuin puuhakkeen hinta lähestyi 100 €/m³.

5 Ruokoseoksen polttamisen vaikutukset

5.1 Vaikutus energiantuotantoon

Palamisen hyötysuhteen parantuminen ei näy suoraan energian tuotantomäärissä, sillä laitos tuottaa automaattisesti tarvittavan määrän energiaa säätämällä polttoaineen syöttönopeutta. Pitkällä aikavälillä tehostetun palamisen vaikutukset näkyvätkin hyötysuhteen paranemisen mukaisena polttoaineen kulutuksen pienenemisenä. Esimerkiksi **Virhe. Viitteen lähdettä ei löytnyt.** mainittu 7 % seos nosti hyötysuhdetta 9,4 prosenttiyksiköllä. Tällöin teoriassa polttoaineen kokonaiskulutus pienenee kokonaisuudessaan noin 12 %. Korkeampi hyötysuhde on huomattavissa myös ajallisesti: jokainen poltettu koe-erä oli tilavuudeltaan samankokoinen, mutta ruokoseoksien polttaminen kesti kauemmin kuin kontrollierän.

5.2 Fyysiset vaikutukset kattilaan

Mahdollisen korroosion vaikutuksia ei voida tarkasti todeta muutaman viikon poltossa, vaan se vaatii useamman vuoden aktiivista seurantaa. Järviruo'on alkuainekoostumuksesta korroosiota aiheuttavan kloorin osuus on kuitenkin noin 0,11 %, mikä on 0,02 prosenttiyksikköä suurempi kuin ruokohelvessä, jonka käyttöä energiantuotannossa on tutkittu paljon. Sekä ruo'on, että helven klooripitoisuudet ovat kuitenkin keskimäärin kymmenen kertaa suuremmat kuin esimerkiksi puupelleteillä (Kask, Energian raaka-aineiden vertailutaulukko 2007). Kun ruokoa poltetaan seospolttoaineena pienillä seossuhteilla, kattilaan asti joutuvan kloorin määrä jää kuitenkin kokonaisuudessaan melko vähäiseksi.

Ruokohelven polttoa Suomessa on tutkinut muun muassa Vapo (nyk. Neova) vuoteen 2011 asti, jolloin kokeilut lopetettiin kannattamattomina. Vapo ei ole julkaissut aiheesta materiaalia, joka viittaisi heidän käyttämien kattiloiden kokeneen kokeidensa aikana korroosion aiheuttamaa vahinkoa.

Lämpölaitokselta kerätylle tuhkalta tehtyjen analyysien perusteella savukaasuihin sekoittuva tuhka sisältää klooria vain 0,3 prosenttiyksikköä enemmän kuin pelkkää puuhaketta poltettaessa (Liite 2). Arinan pohjalle kertyvästä seostuhkasta, tai laboratorioissa tuotetusta ruokotuhkasta ei havaittu klooripitoisuutta.

5.3 Tuhkan tuotanto

Ruo'on tuhkapitoisuuden mitattiin olevan noin viisinkertainen puuhakkeeseen. Tämän takia laitoksen polttaessa haketta 10–20 % ruokoseoksella tuhkaa muodostui noin 1,5–2 kertaa enemmän kuin ilman ruokoa. Ruokojen polttamisen jatkuessa suurella skaalalla neljättä viikkoa tuhkan koostumusta tarkasteltiin ja vastoin odotuksia tuhkassa ei havaittu yhtään sulamisen merkkejä. Tämä oli odottamatonta, sillä normaalisti jopa pelkkää puuhaketta polttaessa tuhkan sekaan on havaittu muodostuvan jonkin verran yhteen sulaneita kivettyneitä paakkuja (Kuva 11).



Kuva 11. Laitoksen tuhkasäiliö ennen ruokojen polttamista ja sen aikana.

Tuhkasäiliö tyhjennettiin noin viikko ruokojen polton aloittamisen jälkeen, mikä antoi hyvät lähtökohdat tuhkien vertailulle. Kuvassa vasemmalla on tuhkasäiliö ennen tyhjäystä, säiliön sisältäen vain puuhakkeen muodostamaa tuhkaa. Tuhka on erittäin karkeaa ja sisältää paljon kivettyntä materiaalia. Oikealla on ruoko-hakeseoksen tuottamaa tuhkaa, joka on huomattavasti hienompaa.

Seostuhka sisälsi jonkin verran paakkuja, mutta kaikki löydetyt olivat kosteuden aiheuttamia ja hajosivat kosketuksesta.

Kokeiden aikana ruo'on osuus polttoaineseoksessa vaihteli jonkin verran. Seurannan aikana huomattiin, että pienemmillä ruoko-osuuksilla tuhkan laatu huononi hieman.

5.4 Taloudelliset vaikutukset

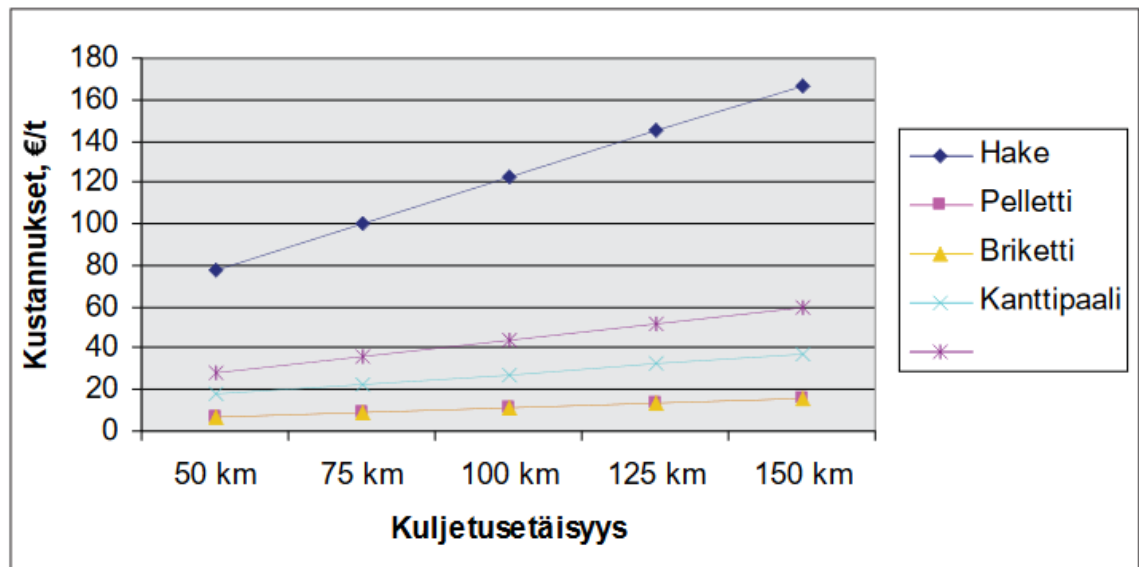
Kokeissa mitatuilla seoksilla ja niiden pohjalta tehdyillä matemaattisilla malleilla ei löydetty ideaalia seosta, jolla ruokoa käyttämällä seospolttoaineena olisi saavutettu merkittävää taloudellista etua. Ruo'on keräämisen korkeiden kustannusten, sekä suhteellisen pienien hyötysuhde-etujen vuoksi nykyisillä puuhakkeen hinnoilla järviruokojen hyödyntäminen energiantuotannossa on tappiollista toimintaa.

6 Haasteita ruo'on laajamittaisessa poltossa

6.1 Logistiikka

Järviruokosilpun todellisen määrän arvioiminen sen tilavuuden perusteella on huomattavan haastavaa. Silpun harvasta irtotiheydestä ja vaihtelevasta kosteudesta johtuen silpun tilavuus suhteessa sen painoon ei ole missään tilanteessa vakio, mikä vaikeuttaa huomattavasti erilaisten ruokoannoksien energiasisältöjen laskemista. Esimerkiksi suuressa läjässä tai suurina annoksina silppu on suuren painolastin seurauksena huomattavasti tiheämpää kuin pieneen ämpäriin kerättyä.

Luotettavin tapa mitata ruo'on todellista määrää olisi sen painon ja kosteuden, ei tilavuuden, perusteella, mikä vaatisi suurten määrien punnitsemisen mahdollistavat tilat ja varusteet sekä edellytykset selvittää ruo'on kosteus.



Kuva 12. Kuljetuskustannukset olkimateriaaleille kuorma-autolla (Komulainen, ym., 2008).

Silputun ruo'on harva irtotiheys myös tekee siitä todella epäkäytännöllistä kuljettaa pitkiä matkoja.

Kuva 12. Kuljetuskustannukset olkimateriaaleille kuorma-autolla (Komulainen, ym., 2008).

on kuvattuna eri muodossa olevien olkimateriaalien kuljetuskustannukset suhteessa kuljetusmatkaan. Huomioitavaa on, että kuvaaja on peräisin vuodelta 2008, joten nykypäivänä todelliset kustannukset ovat inflaation sekä öljyn hinnan kallistumisen myötä paljon korkeammat, mutta sama suhde harvojen ja tiheiden olomuotojen välillä pätee yhä.

6.2 Lainsäädännölliset haasteet

6.2.1 Jätteen poltto

Järviruo'on hyödyntäminen teollisuudessa ja energiantuotannossa voidaan jossain tapauksissa tulkita luvanvaraiseksi jätteen hyödyntämiseksi. Ympäristö- ja koetoimintalupia myöntävät toiminnan laajuuden mukaan aluehallintovirastot tai kunnalliset ympäristönsuojeluviranomaiset. Aluehallintoviraston myöntämiä lupia valvovat ELY-keskukset. Kuntien ympäristönsuojeluviranomaiset valvovat itse myöntämiään lupia. ELY-keskuksilla on mahdollisuus käyttää tulkintaa lupien valvonnassa, mutta viranomaisilla ei kuitenkaan ole selkeää valtakunnallista linjausta siitä, miten niitetty ruoko luokitellaan. On valvojan tulkinnasta riippuvaista, luokitellaanko polttotarkoitukseen niitetyt ruo'ot jätelain mukaisesti jätteeksi vai esimerkiksi sivutuotteeksi, mikä antaa ELY-keskuksille tai kunnallisille viranomaisille valtuuden estää ruo'on polttaminen.

Jos ruoko tulkitaan jätteeksi, sovelletaan lupakäytännöissä valtioneuvoston asetusta keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksista, eli ns. PIPO-asetusta. Asetuksen mukaan energiantuotantolaitoksen, jonka yhteenlaskettu polttoaineteho on 1–50 MW, on tehtävä toiminnasta rekisteröinti-ilmoitus. Jos laitoksen teho on suurempi kuin

50 MW, tai siihen kuuluu vähintään 20 MW kiinteän polttoaineen kattila, tai jos laitos sijaitsee pohjavesialueella, laitos vaatii jätteen vastaanottamisen ja jatkoehdyntämisen mahdollistaman ympäristöluvan.

Taivassalon lämpölaitosta valvoo kunnan ympäristönsuojeluviranomainen. Laitoksen pienen tehon vuoksi laitosta ei ole rekisteröity. Kunnan ympäristönsuojeluviranomainen ei ole katsonut ruokoa jätteeksi (Niskala 2023).

6.2.2 Niittojen luvanhankinta

Ruovikoiden niittämisen kannattavuutta arvioidessa merkittävässä osassa on luvanhankintaprosessi. Ruovikoiden niittäminen vaatii Suomessa käytännössä aina vesistön- tai maa-alueen omistajan luvan. Lupien hankintaprosessi on Turun AMK:n järviruokohankkeissa todettu erityisen vaivalloiseksi ja aikaa vieväksi, sillä suuria ruovikoita niittäessä tarvitaan suostumus jokaiselta maa- tai vesialueen omistajalta, jonka alueelle niitot kohdistuvat.

Suomessa vesialueet kuuluvat joko yksityisille omistajille, järjestäytyneille osakaskunnille, tai järjestäytymättömille osakaskunnille, mikä hankaloittaa luvitusprosessia huomattavasti.

Yksityisessä omistuksessa olevien kiinteistöjen kohdalla luvan saanti on kiinni kiinteistön omistajan asennoitumisesta niittoa kohtaan. Turun AMK:n ruokohankkeissa yksityisten kiinteistöjen omistajia on lähestytty lähettämällä heille kirjeitse suostumuslomake, jossa anotaan lupaa niittoon heidän omistamillaan alueilla. Kirjeen mukana on valmiiksi maksettu paluukuori, jolla omistaja voi lähettää lomakkeen takaisin koululle sen täytettyään. Jos lomaketta ei palauteta, erityisen kriittisten kohteiden kohdalla omistajia on lähestytty myös puhelinsoitoilla tai ovella käymällä.

Järjestäytyneiden osakaskuntien alueiden luvittaminen on todettu kaikista helpoimmaksi prosessiksi, sillä nämä alueet ovat aktiivisesti hallinnoituja ja osakaskunnan edustajistoon saadaan usein helposti yhteys, jolloin päätökset luvan antamisesta saadaan helposti osakaskunnan seuraavan kokouksen

agendalle. Haittapuolena tässä on kuitenkin se, että monesti järjestäytyneiden osakaskuntien kokoukset järjestetään vain yhdestä kahteen kertaan vuodessa.

Järjestäytymättömien osakaskuntien omistamalla alueilla luvanhanhinta on hidasta ja haastavaa. Osakaskunnat ovat lähes aina lähtökohtaisesti epäaktiivisia, eikä niillä ole minkäänlaisia kokouskäytäntöjä. Monessa tapauksessa osakakat eivät edes tiedä kuuluvansa osakaskuntaan, eivätkä ole tietoisia muista osakkaista. Edesmenneiden osakkaiden osuudet kuuluvat heidän kuolinpesälleen, jolloin kuolinpesän koko edustajisto on tavoitettava. Järjestäytymättömien osakaskuntien kohdalla järviruokohankkeet ovat järjestäneet osakaskuntakokouksia ulkopuolisena toimijana, jos kunnasta on löydetty osakas, jonka nimellä kokous on voitu kutsua koolle. Kutsut on lähetettävä osakaskunnan jäsenille vähintään kaksi viikkoa ennen kokouksen ajankohtaa, joten koko prosessiin on varattava aikaa vähintään kuukausi (Savela, ym. 2023).

Edellä mainitut prosessit on toistettava jokaisen yksittäisen kiinteistön kohdalla, jossa niittoja tahdotaan suorittaa. Ellei kiinteistön omistajalta saa lupaa niittämiseen, on kyseisen kiinteistön rajojen sisäpuolelle jäävä ruovikko jätettävä rauhaan. Yksittäisen kiinteistön luvansaannilla voi olla ratkaiseva merkitys niittojen toteuttamiseen, jos merkittävä osa ruovikosta sijaitsee sen alueella.

6.3 Biomassan luonnolliset prosessit

Pitkittyneen läjityksen aikana kostea ruoko alkoi kompostoitumaan ja homehtumaan. Homehtuminen ei ole palamisen tai energiantuotannon kannalta haitallista, mutta homehtunutta materiaalia käsitellessä työntekijöiden hengitystieoirehtimisen riski kasvaa. Kokeiden aikana oireita ei ilmaantunut, sillä materiaalia käsiteltiin lähinnä työkoneista käsin eikä laitoksen polttoainevarastossa tavallisesti vietä pitkiä aikoja. Homeisen materiaalin käsittelyn riskinä on kuitenkin myös homeen leviäminen laitoksen rakenteisiin.

Terminaaliin varastoidun pressulla katetun ruokokasan päältä mitattiin viikoittain, pakkaskeleilläkin 20-, paikoin jopa yli 30 °C lämpötiloja, mikä on

selvä merkki aktiivisesta kompostoitumisprosessista. Kompostoitumisen myötä polttoaine luovuttaa suuria määriä sitomaansa energiaa hukkaan kaasumaisina hiilivety-yhdisteinä, mikä pienentää sen kokonaislämpöarvoa.

Ruoko oli terminaalissa varastoituna pressun alla, mutta suuren kokonsa vuoksi kasaa ei saatu koko pinta-alaltaan peitettyä. Pressun tarkoitus suojata ruokoa sääolosuhteilta sekä rajoittaa hapen pääsyä kasan sisälle käymisen hillitsemiseksi. Pressusta huolimatta ruokojen kompostoituminen oli hyvin aktiivista ja syyssateiden takia ruokojen kosteussisältö vaihteli varastoinnin aikana 42–52 % välillä.

7 Johtopäätökset

7.1 Mittaukset ja tulokset

Järviruokosilpun absoluuttisen määrän mittaaminen tilavuuden avulla alle kuutiometrin kokoisilla erillä on käytännössä hyödytöntä, sillä määrän kasvaessa myös tiheys kasvaa riippuen materiaalin kosteudesta ja silpun laadusta niin paljon, että esimerkiksi kymmenen litran ruokosilppuerän tiheys ei ole verrattavissa tuhannen litran tiheyteen. Koepolttoeriä mitatessa luotettavamman arvion poltetun ruo'on todellisesta määrästä olisi saanut mittaamalla poltetun ruo'on massaa sen tilavuuden sijaan.

Työssä tehdyt kolme koepolttoa suoritettiin huomattavan pienillä koe-erillä, mikä lisää mittausvirheen riskiä huomattavasti. Jatkotutkimuksia olisi tehtävä reilusti suuremmilla koe-erillä, sekä tarkemmin – esimerkiksi massan perusteella – mitatuilla seoksilla. Kokeiden perusteella huomattiin kuitenkin, että pienelläkin määrällä ruokoa voi olla suuri vaikutus hyötysuhteeseen. Optimaalisen suhteen löytämiseksi kokeita tulisi tehdä seoksilla esimerkiksi kahden prosentin välein välillä 0–20 %.

Itse saadut mittaustulokset tukevat osaltaan Moisalon (2011) talviruo'on polttojen yhteydessä tekemiä havaintoja, mutta tarkat tulokset ovat silti huomattavan erilaiset. Esimerkiksi Moisalon kokeissa saavutettiin 10 % seoksella 90,4 % hyötysuhde, vrt. tämän työn kokeissa saavutettu 79,6 % hyötysuhde. Moisalon kokeet suoritettiin 10-, 15-, 20-, 30-, ja 40 tilavuusprosentin seoksilla. Merkittävimmät hyödyt todettiin alle 20 % seoksilla. Tästäkin syystä tarkemmat lisätutkimukset alle 20 % seoksilla ja vakioiduilla mittaamenetelmillä olisivat perusteltuja.

Huomattavaa on myös, että laitoksella käytetty puuhake tulee useasta eri lähteestä, joten myös sen tarkat lämpöarvot vaihtelevat jonkin verran. Metsätaloudessa tuotettu puuhake on koostumukseltaan todella heterogeenista, joten sille on todella vaikea tehdä kattavaa luokittelujärjestelmää. Tässä työssä

tehdyt laskelmat on tehty kokonaan yhdestä näyte-erästä tehtyjen lämpöarvomittausten perusteella.

7.2 Logistiikka & käytännöllisyys

Ruokojen tuotantoketju oli optimaalinen ja tarkoituksenmukainen alusta loppuun. Ruo'on leikkaaminen suoraan silpuksi nosti niittämisen kuluja sekä kuljetuskuluja jonkin verran, mutta pienten välimatkojen takia nousseiden kulujen vaikutukset olivat vähäiset. Jos niittopaikan ja laitoksen välinen etäisyys olisi ollut suurempi, olisi todennäköisesti ollut järkevämpää harkita ruo'on niittoa nipuiksi ja silputa se vasta paikan päällä laitoksella. Ruo'on erikseen silppuamisen tuottamat lisäkulut riippuvat yrittäjän hinnoittelusta, mutta ne olisivat arviolta 3–5 euroa per ruokokuutio. Hankkeen ruokojen kohdalla kustannukset olisivat todennäköisesti olleet noin 1000–1500 euroa.

Kokeiden aikana todettiin, että silputtua kosteaa järviruokoa on mahdollista polttaa puuhakkeen seassa pitkällä aikavälillä ilman, että tankopurkaimiin ja ruuvikuljettimiin perustuvaan kuljetinlaitteistoon muodostuu tukoksia. Pienten koe-erien polttamisesta mitattujen tulosten perusteella pystyttiin varmentamaan, että myös polttoaineeksi epäoptimaalisella syysruo'olla saadaan parannettua puuhakkeen palamisen hyötysuhdetta huomattavasti.

Suurella mittakaavalla poltettaessa samoja tuloksia ei kyetty havainnoimaan, sillä laitoksella ei ole edellytyksiä tai käytäntöjä polttoaineen kulutuksen mittaamiseksi, mutta ruokojen poltolla ei kokeiden aikana havaittu näkyviä negatiivisia vaikutuksia laitoksen toimintaan.

Tuhkista tehtyjen alkuaineanalyysien perusteella ei ole syytä olettaa ruokojen polttamisen aiheuttavan pitkälläkään aikavälillä merkittävää korroosiota polttokoneistolle.

Laitoksella ei ole instrumentteja, joilla pystyttäisiin seuraamaan polttoaineen tarkkaa hetkellistä tai historiallista kulutusta, joten kattilaan menevää tarkkaa seossuhdetta on mahdotonta määrittää. Laitoksessa suurella skaalalla

polttujen seoksien määrät perustuivat aina hyvin karkeisiin arvioihin. Tästä syystä optimaalisen polttoaineseossuhteen saavuttaminen on käytännössä lähes mahdotonta käytetyillä menetelmillä.

Teoriassa olisi kuitenkin mahdollista esimerkiksi rakentaa rinnakkaispolttoaineelle erillinen säiliö, josta ruokoa syötetään tehonohjauksen mukaisesti haluttu määrä suoraan kokoojaruuveille. Tällöin polttoainetta ei tarvitsisi erikseen sekoittaa varastossa, mahdollinen holvaantuminen ei olisi enää ongelmana, ja polttoaineen syöttö ja seos olisi koko ajan optimaalisella tasolla. Tällaisen järjestelmän rakentaminen vaatisi kuitenkin merkittäviä investointeja, jonka takaisinmaksuaika nykyisillä polttoaineen hinnoilla olisi todennäköisesti useita kymmeniä vuosia.

7.3 Sivutuotteet

Korkeampien seossuhteiden havaittiin merkittävästi parantavan tuhkan laatua, todennäköisimmin johtuen ruo'on korkeasta silikaattipitoisuudesta. Ottaen kuitenkin huomioon, että energiantuotannon kannalta parhaat hyötysuhteet saavutettiin huomattavan pienillä seossuhteilla, ruokoa ei ole järkevää käyttää voimalaitoksissa tuhkan laadun parantajana.

8 Loppupäätelmät

Tässä työssä tehtyjen testien ja kokeiden perusteella ruo'on hyödyntäminen lämpölaitoksessa todettiin energiantuotannon kannalta hyödylliseksi, mutta ei taloudellisesti kannattavaksi. Työn raameissa toteutettujen polttokokeiden perusteella ideaalia seossuhdetta ei onnistuttu saavuttamaan. On kuitenkin mahdollista, että nykyisillä hinnoillakin kannattava seossuhde on olemassa, mutta sen löytäminen vaatisi kattavampia tutkimuksia.

Kompostoitumisen ja käymisen vaikutus polttoaineen ominaisuuksiin on myös haitallinen. Tämän vuoksi järviruoko ei – varsinkaan kosteana – sovellu pitkäaikaiseen varastointiin. Olettaen, että lämpölaitos kuluttaa polttoainetta esimerkiksi kuution tunnissa, 10 % seossuhteella poltettaessa 490 kuution polttamiseen kuluisi yli 200 vuorokautta. Tässä ajassa ruokomassan olomuoto ehtii muuttua jo huomattavasti.

Tästä näkökulmasta lämpölaitoksien olisi järkevintä hankkia ruokoa arvioidun kulutuksen perusteella kiinteä määrä kausittaiseksi tueksi, eikä hamstrata sitä varastoon pilaantumaan. Tällöin myös ruokojen keräyksen taloudellinen riski pienenee ja kannattavuus nousee, jos ruo'osta vain osa myydään laitokselle ja loput saadaan myytyä muihin kohteisiin.

Järviruokojen niittäminen ja kerääminen on Suomen lainsäädännön takia hyvin resurssi-intensiivinen prosessi, johon liittyy useita potentiaalisia sudenkuoppia ja todella paljon valmistelutyötä. Tämän takia lämpölaitoksien ei olisi järkevää lähteä omatoimisesti toteuttamaan niittoja polttoaineen tuottamiseksi.

Tulevaisuudessa puuhakkeen hinnan noustessa, on kuitenkin hyvinkin mahdollista ja jopa todennäköistä, että jossain kohtaa ruokoseoksen polttaminen muuttuu laajemmalti taloudellisesti kannattavaksi sillä edellytyksellä, että ruokojen niittoa toteuttavat hankkeet jatkuvat, tai luvan Hankinta helpottuu merkittävästi.

Lähteet

Ajosenpää, Terhi. *Suunnittelulla ja ruo'on hyötykäytöllä tehokkuutta rantojen hoitoon*. Varsinais-Suomen ELY-keskus, 2014.

Joensuu, Ilona, Tanja Myllyviita, Teemu Vilppo, ja Markku Huttunen. *Järeästi järviruo'osta pohjamutia myöten*. Suomen ympäristökeskus, 2014.

Kask, Ülo. *Energian raaka-aineiden vertailutaulukko*. Tallinnan teknillinen yliopisto, 2007.

Kask, Ülo. "Reed as energy resource in Estonia." Teoksessa *Read Up on Reed!*, tekijä: Iiro Ikonen ja Eija Hagelberg, leikannut Iiro Ikonen ja Eija Hagelberg. Vammalan kirjapaino Oy, 2007.

Kask, Ülo, ja Livia Kask. "Reed as a Renewable Energy Source, Equipment and Technologies for Using Reed in Energy Industry." Teoksessa *Guidebook of Reed Business*. Tallinn University of Technology, 2011.

Komulainen, Martti, Päivi Simi, Eija Hagelberg, Iiro Ikonen, ja Sami Lyytinen. *Ruokoenergiaa: järviruo'on energiakäyttömahdollisuudet Etelä-Suomessa*. Turun ammattikorkeakoulu, 2008.

Moisalo, Mikko. "Järviruo'on talvilaadun hyödyntäminen paikallisena bioenergiana." Opinnäytetyö, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2011.

Myllyniemi, Johanna, and Mari Virtanen. "Common Reed." In *Guidebook of Reed Business*, by Ülo Kask. 2013.

Niskala, Seija. *Uudenkaupungin vt. ympäristösihteeri*. Sähköpostikeskustelu. 2023.

Pitkänen, Timo. *Missä ruokoa kasvaa? - Järviruo'okoalueiden satelliittikartoitus Etelä-Suomen ja Viron Väinämeren rannikoilla*. Turun AMK, 2006.

Roosaluste, Elle. "The Reed Itself." In *Read Up on Reed!*, edited by Iiro Ikonen and Eija Hagelberg. Vammalan kirjapaino Oy, 2006.

Savela, Nina, Noora Norokytö, Jerome Tornikoski, ja Enne-Maria Witick.
"Järviruoko hyötykäyttöön! -loppuwebinaari." Turku, 2023.

SFS, Suomen Standardoimisliitto. *Kiinteät kierrätyspolttoaineet. Lämpöarvon määrittäminen*. Suomen Standardoimisliitto SFS, 2021.

Silén, Henna. "Järviruoko on korjuumahdollisuudet bioenergia- ja rakennuskäyttöön Etelä-Suomen rannikkoalueilla." Opinnäytetyö, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2007.

Starck, Sami. "Toimitusjohtaja, Starament Oy." *Haastattelu*. (17. Lokakuu 2023).

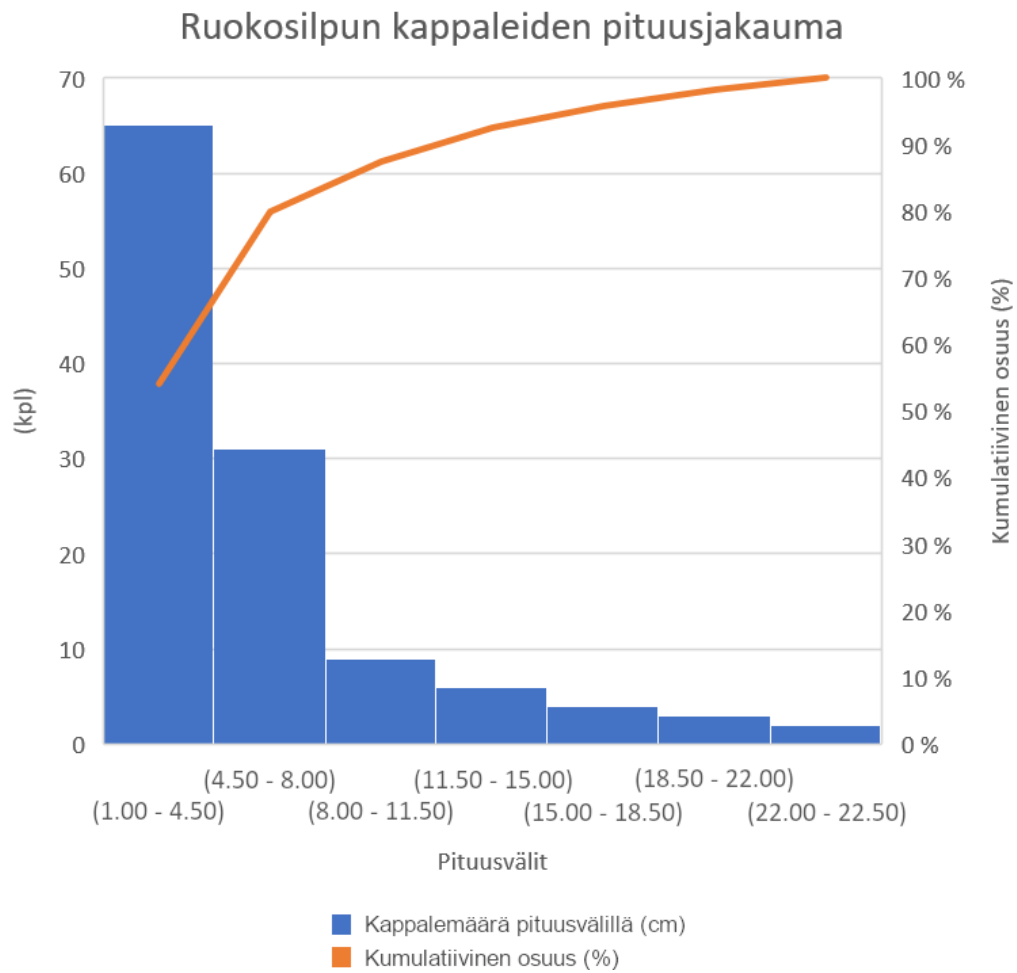
Tilastokeskus. "Polttoaineluokitus / Bränsleklassificering / Fuel classification."
Tilastokeskus. 2023.

https://tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html (haettu 09. 11 2023).

Yhteisaluelaki §4. 1997. <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1989/19890758>
(accessed 11 30, 2023).

Laboratoriomittausten tulokset

Pituushajonta



Kuiva-ainepitoisuus

Koepolttoerät:

Ruoko

$$W_m = \frac{(2265 \text{ g} - 1920 \text{ g})}{(2265 \text{ g} - 1493 \text{ g})} * 100 = 44.7 \%$$

Puuhake

$$W_m = \frac{(3252 \text{ g} - 2842 \text{ g})}{(3525 \text{ g} - 1481 \text{ g})} * 100 = 33,4 \%$$

Ruokojen viikoittaiset kosteuden muutokset polttokokeiden aloituksen jälkeen:

VIKKO	KOSTEUS (%)	MUUTOS
43	51,5 %	
44	42,8 %	-8,3
45	49,5 %	+6,7
46	44,3 %	-5,2
47	43,2 %	+1,1
48	69,9 %	+26,7

Energiasisältö

Ensimmäinen mittausseisio, pommikalorimetrin tulokset mittausjärjestyksessä

	MASSA (g)	ENERGIASISÄLTÖ (J/g)	PALAMINEN
PUUHAKE 1	0,42750	17 345	Täydellinen
JÄRVIRUOKO 1	0,47110	12 748	Epätäydellinen
JÄRVIRUOKO 2	0,44700	15 724	Epätäydellinen
JÄRVIRUOKO 3	0,35870	17 965	Täydellinen
JÄRVIRUOKO 4	0,36640	11 151	Epätäydellinen
JÄRVIRUOKO 5	0,46890	13 581	Epätäydellinen
JÄRVIRUOKO 6	0,48500	11 035	Epätäydellinen
JÄRVIRUOKO 7	0,26770	15 139	Epätäydellinen
JÄRVIRUOKO 8	0,24810	9 956	Epätäydellinen
PUUHAKE 2	0,53390	8 758	Epätäydellinen
PUUHAKE 3	0,67780	0	Täydellinen*

*Mittauksen kohdalla kalorimetrin sisäisessä toiminnassa tuli häiriö, minkä vuoksi täydellisestä palamisesta huolimatta kone ei tuottanut mittaustulosta.

Toinen mittausseisio, tulokset mittausjärjestyksessä

	MASSA (g)	ENERGIASISÄLTÖ (J/g)	PALAMINEN
JÄRVIRUOKO 1	0,39830	17 710	Täydellinen
JÄRVIRUOKO 2	0,41240	17 706	Täydellinen
JÄRVIRUOKO 3	0,45360	17 721	Täydellinen
PUUHAKE 1	0,44080	19 141	Täydellinen
PUUHAKE 2	0,54260	19 259	Täydellinen
PUUHAKE 3	0,59360	19 277	Täydellinen

Tuhkapitoisuus

	UPOKKAAN MASSA (mg)	UPOKAS + NÄYTE (mg)	NÄYTE (mg)
1 JÄRVIRUOKO	17 386,2	21 422,82	4 036,67
2 JÄRVIRUOKO	18 095,0	22 127,92	4 032,92
3 PUUHAKE	18 064,4	23 156,08	5 091,68
4 PUUHAKE	18 612,8	23 734,90	5 122,10

	UPOKAS + TUHKA (mg)	TUHKA (mg)	TUHKAPITOISUUS- %
1 JÄRVIRUOKO	17 596,6	183,4	4,54 %
2 JÄRVIRUOKO	18 283,8	188,8	4,68 %
3 PUUHAKE	18 116,3	51,9	1,01 %
4 PUUHAKE	18 665,5	52,7	1,03 %

Tuhkien alkuainepitoisuudet

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	ZnO
TULIPESÄ: HAKE-RUOKO	0,77	8,67	1,99	11,93	5,51	1,50		12,73	53,33	0,25		2,10	1,22	
SAVUKAASU: HAKE-RUOKO	1,21	5,09	1,70	26,93	3,91	6,20	1,53	9,85	34,37			1,33	7,90	
TULIPESÄ: HAKE	1,46	7,64	4,44	21,88	4,15	3,04	0,27	8,05	40,27	1,65	0,26	1,54	4,25	1,10
SAVUKAASU: HAKE	0,60	6,60	2,52	10,90	6,60	7,11	1,23	9,90	44,90			1,40	7,33	0,96
UUNI 900 C: HAKE	1,57	12,01	1,95	6,11	10,26	5,30		7,45	51,16	1,76			1,25	1,18
UUNI 900 C: RUOKO	2,79	1,23	0,37	82,15	1,56	4,10		5,16	2,18				0,45	

Thomas Kronberg / Åbo Akademi

Koepolttojen mittauspöytäkirjat

Koepolttojen mittauspöytäkirjat suoritusjärjestyksessä.

1. 10 % seossuhde
2. Kontrolli
3. 7 % seossuhde

KLO	T_ulko [°C]	T_huone [°C]	T_verk.meno [°C]	T_verk.paluu [°C]	T_katt.paluu [°C]	T_katt.meno [°C]	Jäännöshappi [%]	T_savu [°C]
9.21.00	12,70	32,60	80,10	47,00	69,50	81,10	10,06 %	119,00
9.26.00	12,70	32,70	80,20	47,00	69,90	81,30	9,07 %	119,00
9.31.00	12,70	32,80	80,50	47,00	69,90	81,30	10,02 %	118,00
9.36.00	12,70	32,80	80,50	47,00	69,90	81,50	10,07 %	117,00
9.41.00	12,70	32,00	80,60	48,00	70,40	81,30	11,03 %	117,00
9.46.00	12,90	30,80	80,30	48,00	70,10	80,90	11,08 %	116,00
9.51.00	12,90	29,60	79,90	48,00	69,90	81,00	10,01 %	119,00
9.56.00	12,90	29,60	80,30	48,00	70,40	81,60	11,04 %	117,00
10.01.00	12,80	29,40	80,40	48,00	70,50	81,30	11,01 %	117,00
10.06.00	12,90	28,80	80,50	48,00	70,50	81,60	11,09 %	115,00
10.11.00	12,90	29,00	80,50	48,00	70,50	81,50	11,01 %	116,00
	T_pesä [°C]	Alipaine [Pa]	p_verk.paluu [bar]	p_verk.meno [bar]	P_verkosto [kW]	P_syötetty [MWh]	Tehonohjaus [%]	
9.21.00	643,00	16,00	2,00	5,00	409,10	64972,47	31,60 %	
9.26.00	641,00	17,00	2,00	5,00	425,50	64972,51	25,00 %	
9.31.00	628,00	16,00	3,00	6,00	433,70	64972,54	25,00 %	
9.36.00	631,00	14,00	2,00	5,00	414,20	64972,58	25,00 %	
9.41.00	616,00	11,00	2,00	5,00	400,90	64972,61	28,30 %	
9.46.00	577,00	16,00	2,00	5,00	436,40	64972,64	38,30 %	
9.51.00	580,00	13,00	3,00	6,00	369,90	64972,68	25,00 %	
9.56.00	590,00	14,00	3,00	6,00	389,00	64972,71	25,00 %	
10.01.00	578,00	13,00	2,00	6,00	396,70	64972,74	25,00 %	
10.06.00	582,00	15,00	2,00	5,00	412,30	64972,77	26,60 %	
10.11.00	587,00	18,00	2,00	5,00	408,80	64972,80	21,60 %	

KLO	T_ulko [°C]	T_huone [°C]	T_verk.meno [°C]	T_verk.paluu [°C]	T_katt.paluu [°C]	T_katt.meno [°C]	Jäännöshappi [%]	T_savu [°C]
12.06.00	13,80	30,10	81,10	48,00	70,30	82,10	11,30 %	113,00
12.11.00	13,70	30,00	81,10	49,00	70,70	81,80	11,40 %	112,00
12.16.00	13,70	29,20	80,80	49,00	70,20	81,70	11,30 %	113,00
12.21.00	13,70	29,40	80,90	48,00	70,50	81,70	11,90 %	112,00
12.26.00	13,70	29,50	80,50	48,00	70,10	81,50	11,60 %	113,00
12.31.00	13,70	28,70	80,60	48,00	69,90	81,60	10,90 %	113,00
12.36.00	13,70	28,80	80,70	48,00	70,10	81,50	11,20 %	113,00
12.41.00	13,70	28,70	80,70	50,00	70,30	81,90	11,10 %	114,00
12.46.00	13,70	28,00	80,80	49,00	70,50	81,80	10,80 %	114,00
12.51.00	13,70	28,00	80,90	48,00	70,50	81,70	11,10 %	113,00
12.56.00	13,70	28,20	80,80	48,00	70,50	81,70	11,20 %	113,00
13.01.00	13,80	27,90	80,70	48,00	70,50	81,40	11,30 %	113,00
	T_pesä [°C]	Alipaine [Pa]	p_verk.paluu [bar]	p_verk.meno [bar]	P_verkosto [kW]	P_syötetty [MWh]	Tehonohjaus [%]	
12.06.00	587,00	19,00	2,00	5,00	448,40	64973,60	15,00 %	
12.11.00	576,00	11,00	2,00	5,00	428,90	64973,63	21,60 %	
12.16.00	572,00	17,00	2,00	5,00	346,90	64973,66	21,60 %	
12.21.00	576,00	11,00	2,00	5,00	413,30	64973,69	25,00 %	
12.26.00	572,00	17,00	2,00	5,00	364,40	64973,73	23,30 %	
12.31.00	583,00	16,00	2,00	5,00	432,80	64973,76	21,60 %	
12.36.00	582,00	19,00	2,00	5,00	399,70	64973,80	26,60 %	
12.41.00	590,00	16,00	2,00	5,00	323,90	64973,83	20,00 %	
12.46.00	583,00	13,00	2,00	5,00	348,70	64973,86	18,30 %	
12.51.00	582,00	15,00	2,00	5,00	379,10	64973,89	18,30 %	
12.56.00	571,00	17,00	2,00	5,00	412,90	64973,92	21,60 %	
13.01.00	559,00	17,00	2,00	5,00	363,60	64973,95	26,60 %	

KLO	T_ulko [°C]	T_huone [°C]	T_verk.meno [°C]	T_verk.paluu [°C]	T_katt.paluu [°C]	T_katt.meno [°C]	Jäännöshappi [%]	T_savu [°C]
13.22.00	13,90	27,30	81,10	49,00	70,10	81,50	11,70 %	111,00
13.27.00	14,00	27,90	80,70	48,00	70,50	81,70	10,40 %	113,00
13.32.00	14,10	27,80	80,90	48,00	70,70	81,90	11,40 %	111,00
13.37.00	14,20	27,50	80,70	48,00	70,50	81,60	11,10 %	112,00
13.42.00	14,20	27,70	80,90	48,00	69,70	81,50	11,60 %	112,00
13.47.00	14,30	27,90	80,30	49,00	70,10	81,10	11,40 %	113,00
13.52.00	14,30	27,50	80,50	49,00	70,30	81,70	11,80 %	112,00
13.57.00	14,30	27,70	80,60	48,00	70,10	81,70	11,40 %	113,00
14.02.00	14,30	27,30	80,50	48,00	69,90	81,40	11,80 %	112,00
14.07.00	14,30	27,60	80,30	47,00	69,90	81,40	10,90 %	114,00
14.12.00	14,30	27,30	80,50	48,00	70,30	81,90	11,10 %	114,00
14.17.00	14,30	27,70	80,70	48,00	70,20	81,70	11,20 %	113,00
14.22.00	14,30	27,70	80,70	47,00	70,50	81,30	12,20 %	112,00

	T_pesä [°C]	Alipaine [Pa]	p_verk.paluu [bar]	p_verk.meno [bar]	P_verkosto [kW]	P_syötetty [MWh]	Tehonohjaus [%]
13.22.00	551,00	15,00	3,00	6,00	457,80	64974,09	25,00 %
13.27.00	569,00	17,00	3,00	6,00	387,10	64974,11	18,30 %
13.32.00	563,00	18,00	3,00	6,00	339,50	64974,15	21,60 %
13.37.00	553,00	19,00	2,00	5,00	342,60	64974,18	21,60 %
13.42.00	557,00	16,00	2,00	5,00	449,10	64974,21	26,60 %
13.47.00	552,00	15,00	2,00	5,00	392,10	64974,24	28,30 %
13.52.00	560,00	14,00	2,00	5,00	344,50	64974,27	25,00 %
13.57.00	563,00	14,00	2,00	5,00	336,50	64974,30	21,60 %
14.02.00	552,00	16,00	3,00	6,00	375,30	64974,33	28,30 %
14.07.00	562,00	13,00	3,00	6,00	368,10	64974,37	25,00 %
14.12.00	577,00	12,00	3,00	6,00	374,10	64974,39	20,00 %
14.17.00	560,00	12,00	3,00	6,00	388,40	64974,43	21,60 %
14.22.00	540,00	17,00	2,00	5,00	350,50	64974,46	28,30 %