

LUC

Hajautettu biokaasun tuotanto Lapissa -hanke

Yhdyskuntajätteen pelletöinti ja polttokokeet

1. Johdanto

Osana Hajautettu biokaasun tuotanto Lapissa – hanketta Lapin ammattikorkeakoulun vastuulla oli selvittää jätteiden energiasisältö. Lisäksi työssä selvitettiin jätteen pelletoitävyyttä, sekä pellettien poltosta aiheutuvia päästöjä.

2. Menetelmät

Tässä kappaleessa tarkastellaan pelletöinnin ja polttokokeiden toteutuksessa käytettyjä menetelmiä.

2.1 Tarkasteltu jäteseos

Tarkasteltu jätejakauma perustuu jätehuoltoyritys Lapecon alueelta helmikuussa 2025 kerättyyn jätejakeeseen. Jakeen jätteselvitys toteutettiin Rovaniemellä 25.-26.2.2025. Jätteselvityksen tulos on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Jätteselvityksen tulokset

Jae	Massa (kg)	Massa-%
Biojäte	131,1	37,5 %
Paperi	45,2	12,9 %
Kartonki ja pahvi	28,4	8,1 %
Puu	4,8	1,4 %
Muovit	53,0	15,2 %
Lasi	10,4	3,0 %
Metallit	5,0	1,4 %
Tekstiilit ja jalkineet	15,9	4,5 %
Sähkölaitteet ja akut	0,9	0,3 %
Vaaralliset kemikaalit	0,6	0,2 %
Sekalaiset jätteet	54,1	15,5 %
Yht.	349,3	100,0 %

Tarkasteltava jäteseos kerättiin ja tuotettiin työturvallisuuden varmistamiseksi Lapin AMK:n Rovaniemen kampuksella. Tarkasteltavan jätejakeen ulkopuolelle jätettiin vaaralliset jätteet sekä palamattomat materiaalit.

Biojätteenä käytettiin hotellilta saatua jätettä. Paperijäte muodostui pääosin kopiopaperista ja kiiltäväpintaisesta paperista. Kartonki- ja pahvijätteenä käytettiin

pääasiassa pinnoitettua aaltopahvia. Puumateriaalina käytettiin valmista kaupallista puupellettiä. Muovijäte muodostui suuritiheyspolyeteenistä (PE-HD), polypropeenista (PP), sekä polyetyleenitereftalaatista (PET). Tekstiilijäte muodostui puuvillan ja polyesterin seoksesta. Sekalainen jäte muodostettiin jakamalla sekalaisen jätteen kokonaismassa tasan biojätteen, paperin, pahvin, puun, muovin ja tekstiilin kesken.

2.2 Pelletöinti

Pelletöitävän materiaalin on oltava riittävän hienojakoista, jotta aines voidaan puristaa pellettipuristimen matriisien läpi. Pelletöintiä varten kaikki jätejakeet biojätettä lukuun ottamatta murskattiin vasaramyllyllä. Biojäte jauhettiin ja kuivattiin.

Pelletit valmistettiin pellettipuristimella, jossa käytettiin 8 mm reikäkoon matriisia. Pellettejä valmistettiin useita eriä, jotta pelleteistä saatiin riittävän lujia polttokokeita varten. Polttokokeissa käytetyssä laitteistossa pelletit syötetään palopesään ruuveilla, minkä vuoksi pellettien oli kestettävä ruuvikuljettimien aiheuttama mekaaninen rasitus. Pelletöintiprosessissa havaittiin, että muovi sitoutui huonosti muihin käytettyihin materiaaleihin, minkä vuoksi muovin osuus tuotetuissa pelleteissä jäi jäteselvityksessä esitettyä matalammaksi. Suuri muovin osuus teki pelleteistä hauraita.

Pelleteille saavutettiin riittävä lujuus seossuhteella, jossa oli yhdyskuntajätettä 50 % ja puuta 50 % seoksen yhteenlasketusta massasta (myöh. seospelletti). Yhdyskuntajätettä simuloivan osuuden seossuhteet määriteltiin jäteselvityksessä saatujen suhteiden mukaan.

2.3 Polttokokeet

Polttokokeet suoritettiin Lapin AMK:n energiatekniikan laboratoriossa 12.8.2025. Polttokokeiden tarkoituksena oli selvittää seospellettien poltossa aiheutuvat päästöt. Poltot suoritettiin Hylcflame 20 kW pellettikattilalla. Palokaasujen päästöt mitattiin MRU Vario Plus – savukaasuanalysaattorilla. Savukaasuanalysaattorilla mitattujen arvojen mittaustarkkuus on esitetty taulukossa 2.



Taulukko 2 Savukaasuanalysaattorin mittaustarkkuus

Mitatut arvot	Mittaustarkkuus
CO	5 %
CO ₂	0,01 %
NO	± 5 ppm / 5 %
NO ₂	± 5 ppm / 5 %
SO ₂	± 10 ppm / 5 %

Polttokokeen aluksi pellettikattila lämmitettiin puupelletillä polttotapahtuman asianmukaisen toiminnan varmistamiseksi. Lisäksi puupelletin poltosta saatiin vertailukohta seospellettien päästöjen arvioimiseksi.

2.4 Lämpöarvon määrittäminen

Lämpöarvon määrittäminen suoritettiin pommikalorimetrillä valmiista pelleteistä. Mittauksessa välineinä käytettiin:

- Pommikalorimetri: Isoperibol IKA C6000
 - o Mittalaite kalibroitu 25°C (CEN/TS 16023:2013)
 - o Sytytyslankana käytettiin valmistajan toimittamia puuvilla lankoja
- Kosteusanalysaattori: OHAUS MB23
 - o Mittalaitteen tarkkuus: ±0,6%
- Tarkkuusvaaka: Huazhi HZY-A320
 - o Mittalaitteen tarkkuus: ±2mg / ±5mg

Testin pelletteinä käytettiin polttokokeiden kosteuden määrittämisessä käytettyjä kuivattuja pellettejä. Kuivauksen jälkeen pelletit oli säilytetty ilmatiiviissä pussissa.

Kalorimetrinen mittaaminen suoritettiin mittauksissa alla esitetyn listan mukaisesti:

- Näytteistä punnittiin 1g näyte, josta mitattiin kosteus kosteusanalysaattorilla.
- Kalorimetrisessä mittauksessa näytettä punnittiin mitta-astiaan (1,0 ±0,2)g (SFS-EN ISO 18125:2017)
- Punnittu näyte poltettiin pommikalorimetrissä.



- Polton jälkeen pommikalorimetrin astia purettiin ja tarkastettiin täydellinen palaminen.

Tarkastuksessa etsittiin noki jäämiä säiliön sisäseiniltä, jotka viittaavat epäpuhtaaseen palamiseen. Näytteen palaessa epäpuhtaasti, tulos on hylättävä ja uusittava. Tarvittaessa näytteeseen voidaan lisätä paloa avustavia aineita (CEN/TS 16023:2013). Näytteiden välissä kalorimetrin säiliö, sekä mitta-asti kuivattiin nukkaamattomalla liinalla.

3. Tulokset

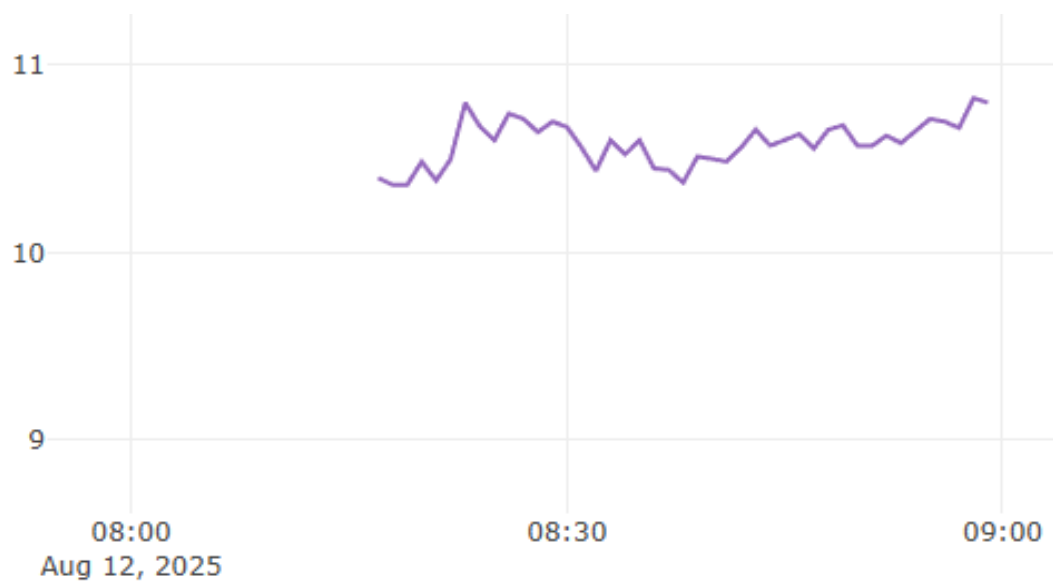
Polttokokeiden tuloksina määriteltiin jäteseos-puupellettien poltossa syntyvien savukaasujen päästöt.

3.1 Puupelletti

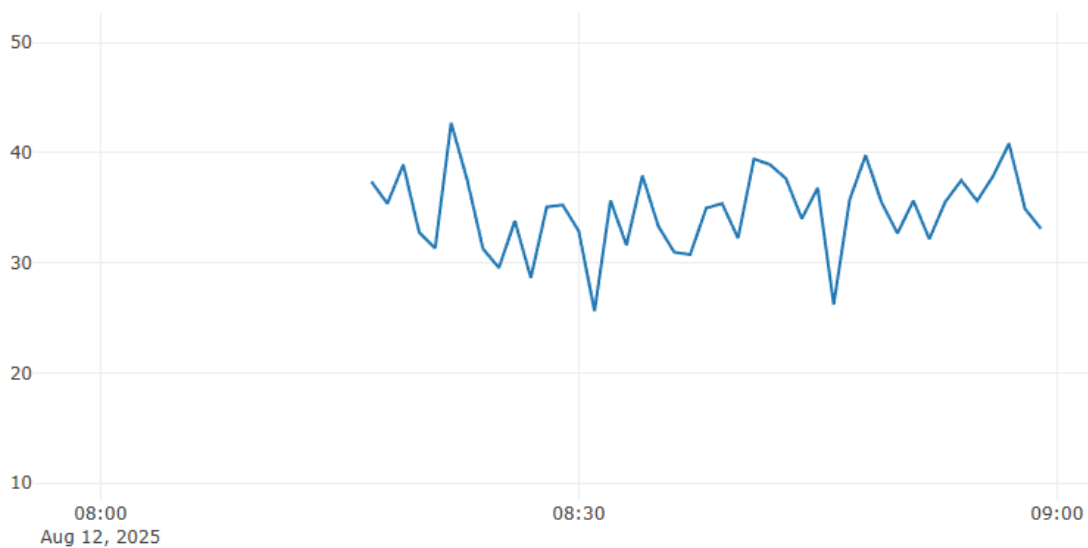
Taulukossa 3 on esitetty polttokokeen tasoittuneen ajanjakson aikana arvioidut savukaasupäästöt sekä poltosta saatava teho. Kuvissa 1–7 on esitetty kuvaajat kaikista mitatuista arvoista. Mittausdatan tallennuksessa ilmeni häiriö, minkä vuoksi tietoa ei saatu polton aloituksesta lähtien. Häiriö korjattiin kello 8:17, ja kuvaajat alkavat tästä ajankohdasta. Kaikki kuvaajat esittävät mitatut arvot minuutin keskiarvoina.

Taulukko 3 Puun savukaasupäästöt sekä teho

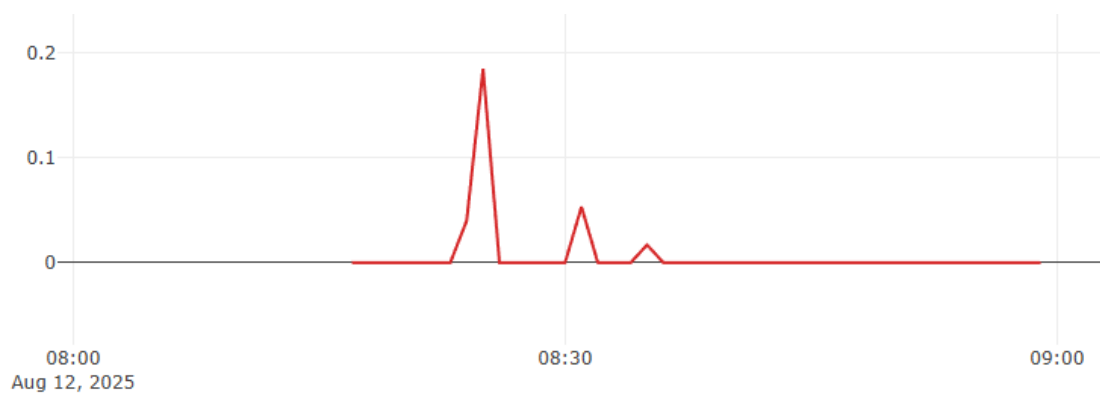
Teho (kW)	10,7
NO (ppm)	34
SO ₂ (ppm)	0
NO _x (ppm)	34
O ₂ (%)	13
CO ₂ (ppm)	7
CO (ppm)	50
NO ₂ (ppm)	0



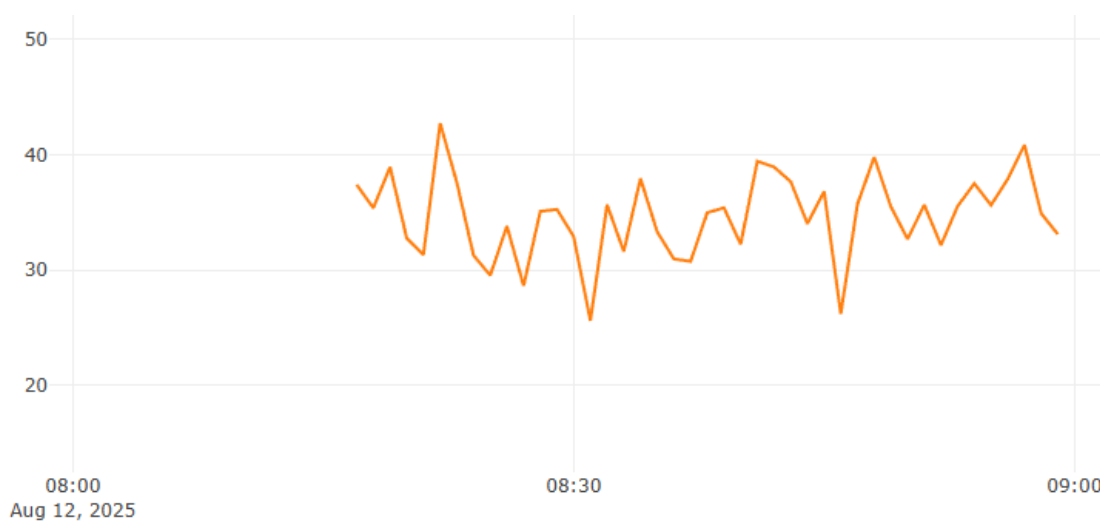
Kuva 1 Teho (kW)



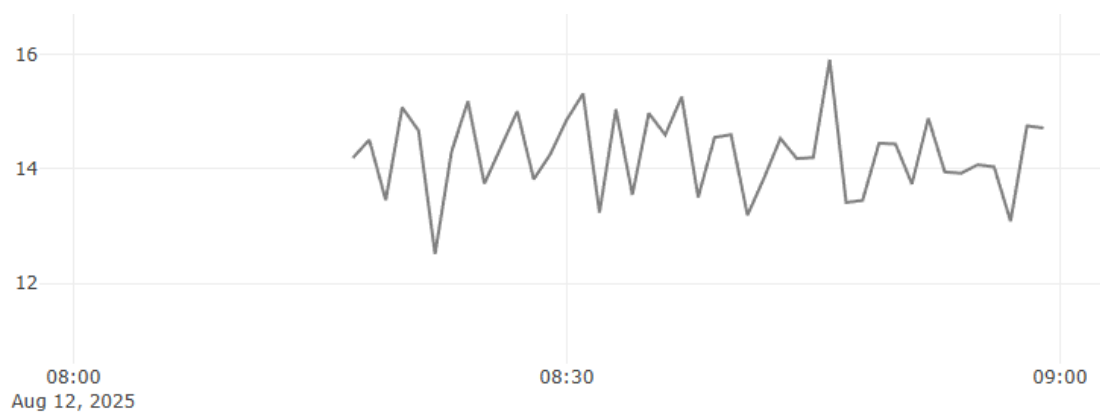
Kuva 2 NO (ppm)



Kuva 3 SO₂ (ppm)



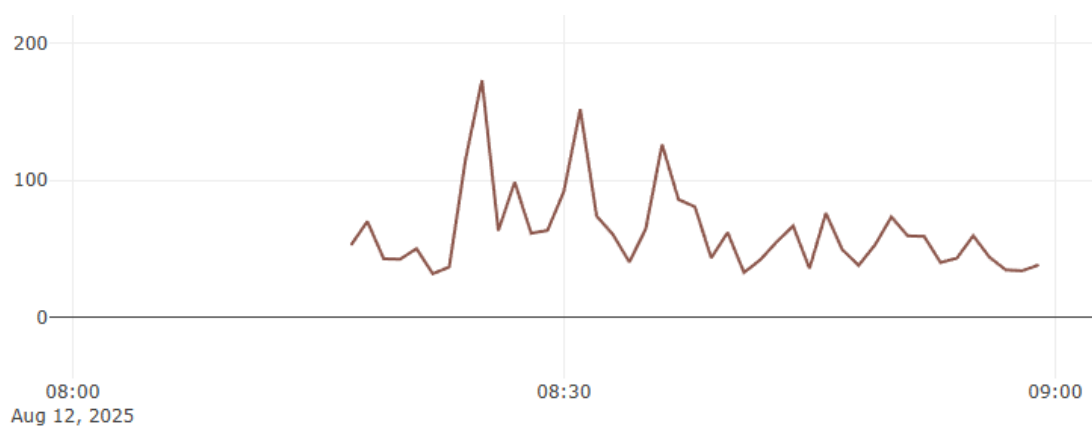
Kuva 4 NO_x (ppm)



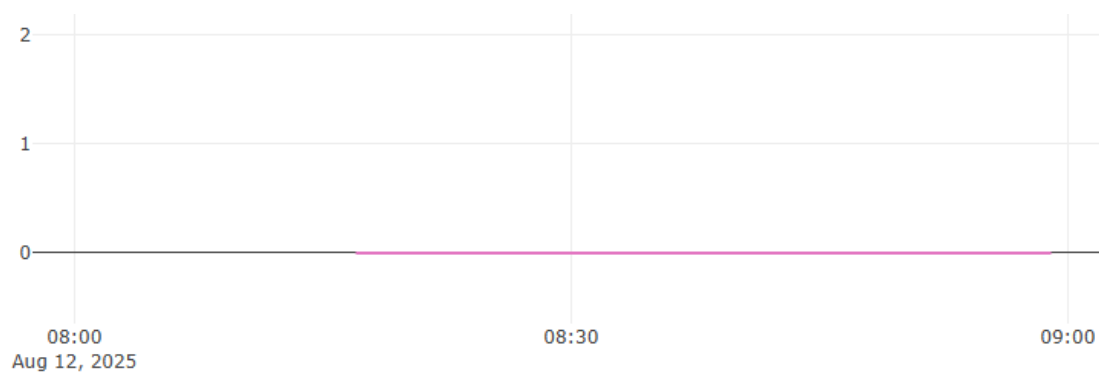
Kuva 5 O₂ (ppm)



Kuva 6 CO₂ (ppm)



Kuva 7 CO (ppm)



Kuva 8 NO₂ (ppm)

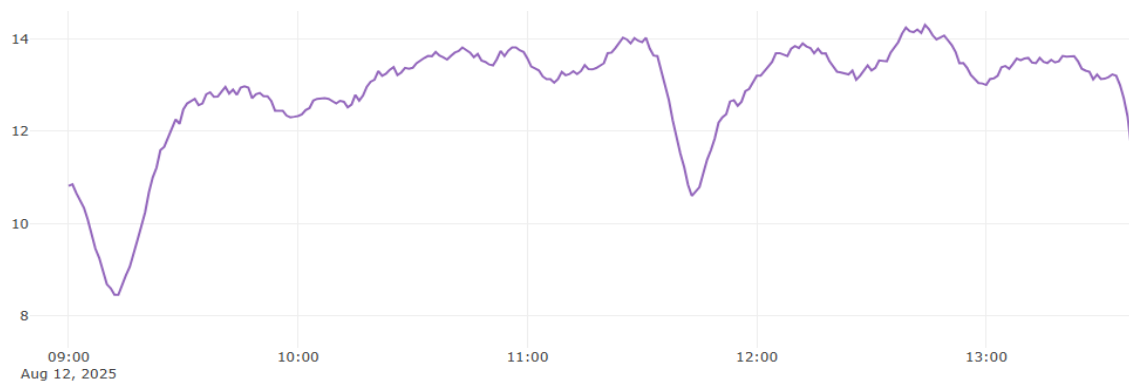


3.2 Seospelletti

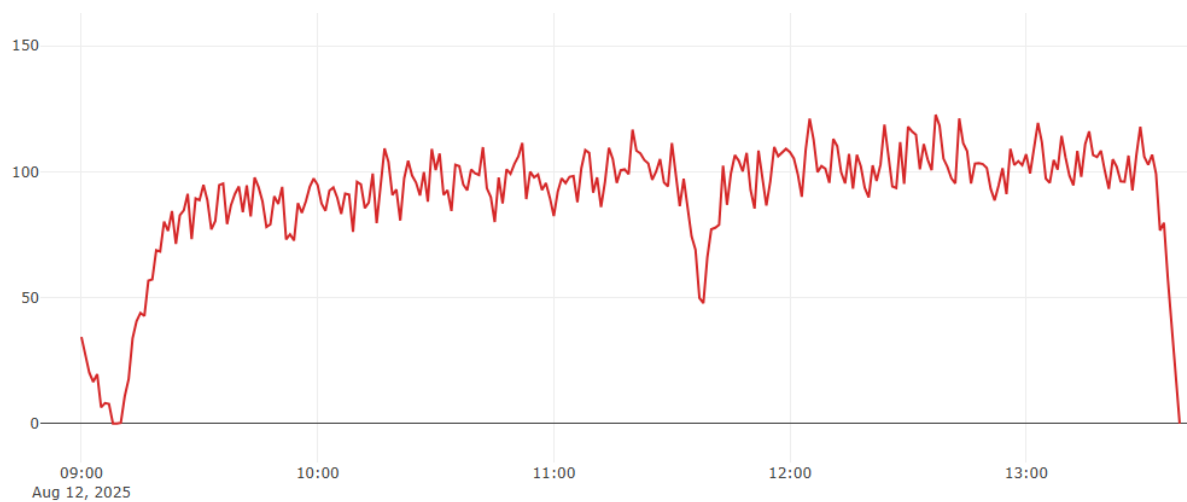
Taulukossa 4 on esitetty polttokokeen tasoittuneen ajanjakson aikana arvioidut savukaasupäästöt sekä poltosta saatava teho. Kuvissa 9–16 on esitetty kuvaajat kaikista mitatuista arvoista. Ajanjaksoilla 9:00–9:10 ja 11:35–11:45 havaittiin poikkeamia, jotka johtuivat materiaalin syöttöhäiriöistä. Kuvaajat esittävät mitatut arvot minuutin keskiarvoina.

Taulukko 4 Seospelletin savukaasupäästöt sekä teho

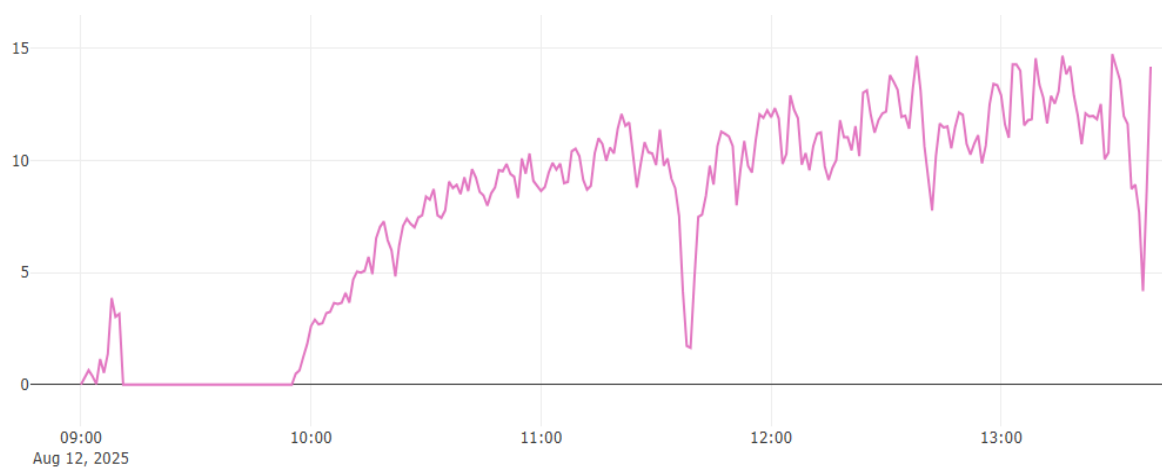
Teho (kW)	13,6
NO (ppm)	105
SO ₂ (ppm)	13
NO _x (ppm)	110
O ₂ (%)	12
CO ₂ (ppm)	9
CO (ppm)	20
NO ₂ (ppm)	1,15



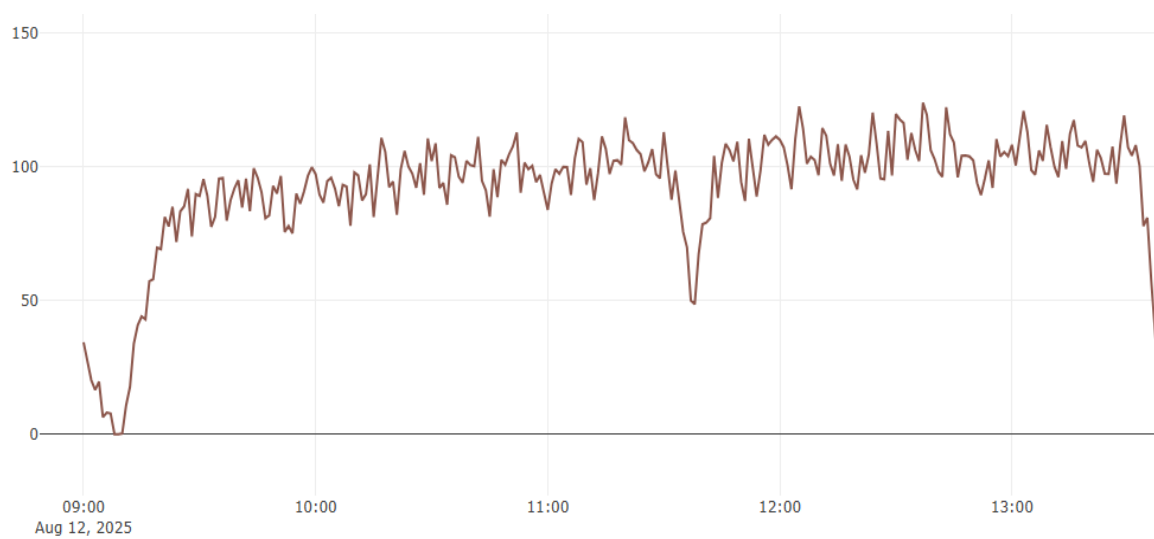
Kuva 9 Teho (kW)



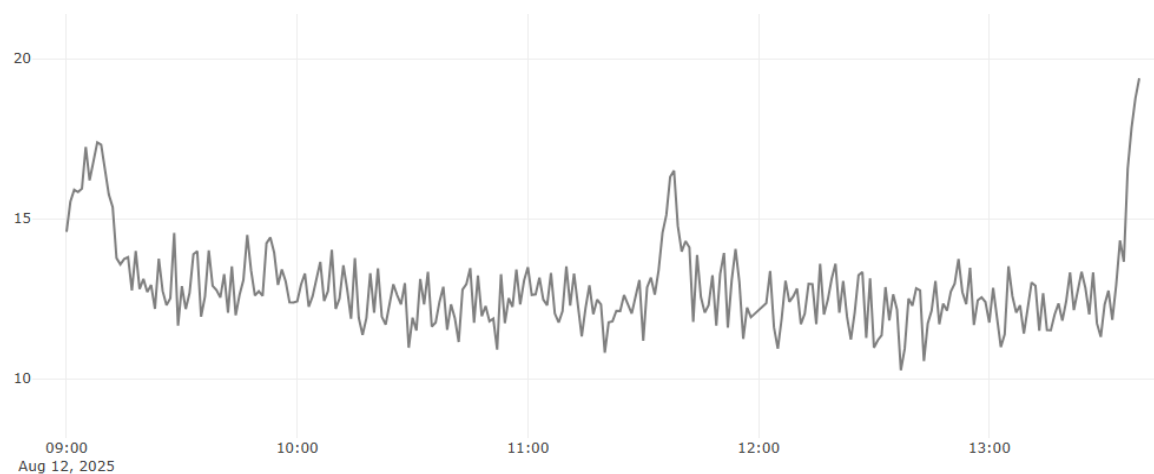
Kuva 10 NO (ppm)



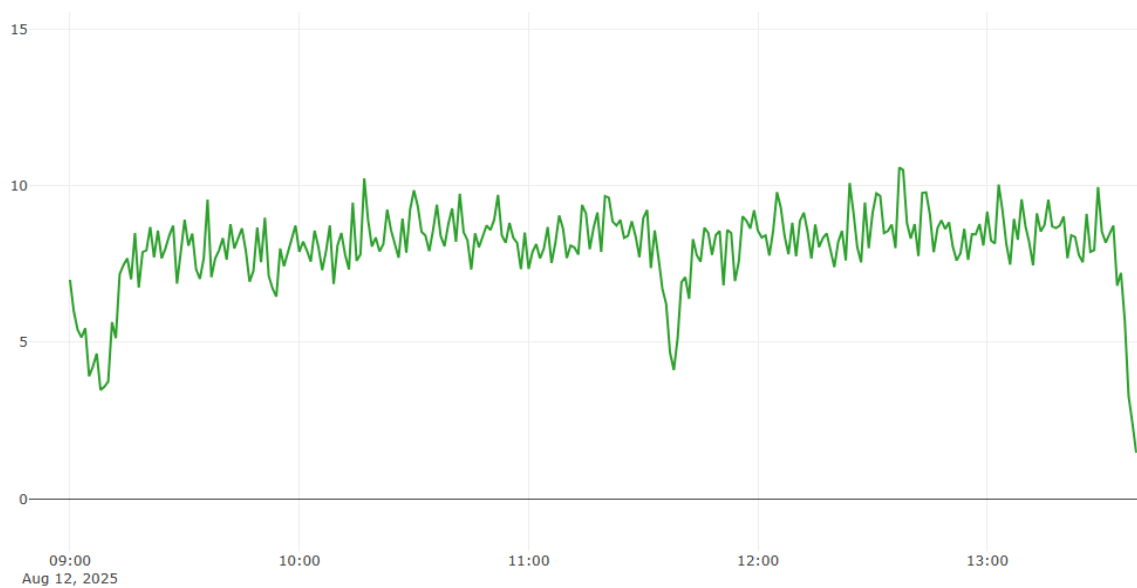
Kuva 11 SO2 (ppm)



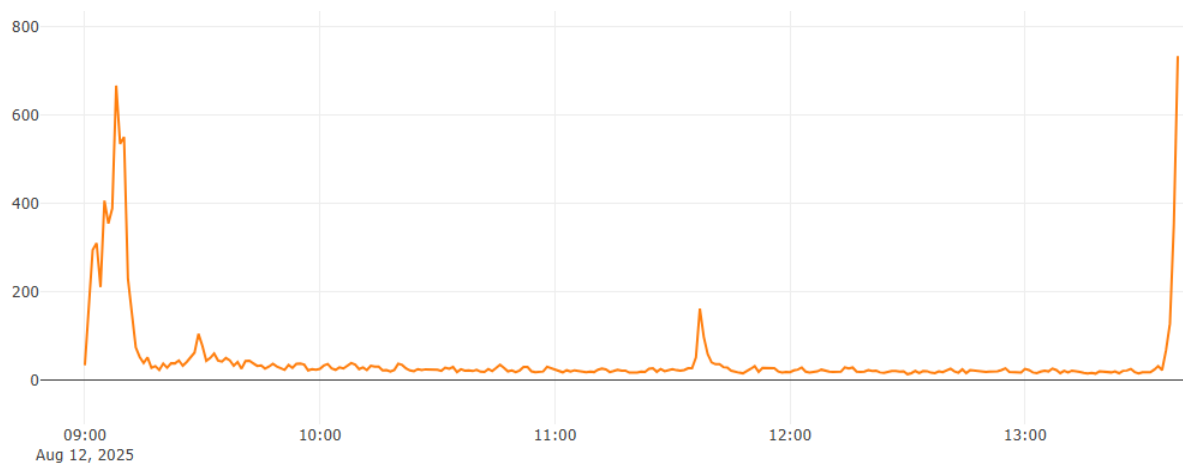
Kuva 12 NOx (ppm)



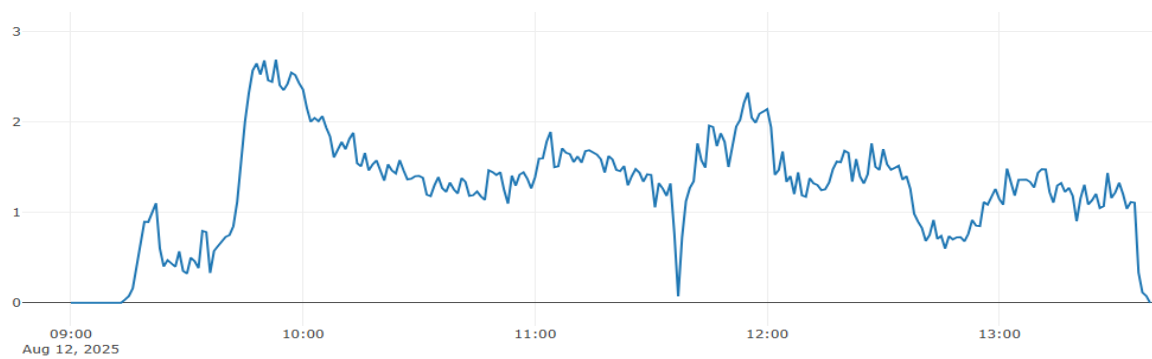
Kuva 13 O2 (ppm)



Kuva 14 CO₂ (ppm)



Kuva 15 CO (ppm)



Kuva 16 NO₂ (ppm)

3.3 Lämpöarvo

Lämpöarvon määrittämisen mittaukset suoritettiin yhtenä päivänä. Mittaus hetkellä huoneen lämpötila oli aloitus hetkellä 22,5°C ja nousi mittauksen aikana 23°C asteeseen. Mitattavat tuotteet ovat kaikki hyvin palavia, eikä näytteissä tullut yhtään epäonnistunutta testiä. Testeihin ei myöskään tarvittu paloa avustavia aineita. Mittauksien tulokset ovat nähtävillä taulukosta 5.

Taulukko 5 Pommikalorimetrin tulokset

Mittaus	Polttoaineen massa (g)	Kosteusprosentti (%)	Lämpöarvo (J /g)	Lämpöarvo (MJ / kg)
Näyte 1	0,941	2	23 108	23,1
Näyte 2	0,833	2	23 363	23,4
Näyte 3	0,977	2	23 374	23,4
Näyte 4	1,09	2	23 363	23,4
Näyte 5	0,923	2	23 121	23,1
Näyte 6	0,937	2	23 482	23,5

3.4 Laskenta

Testeissä ei määritetty mitattavien aineiden rikki-, typpi- eikä halogeenipitoisuuksia, joten laskenta toteutettiin (CEN/TS 16023:2013) esitetyillä yksinkertaistetuilla laskenta kaavoilla.



Kokonaislämpöarvon (kalorimetrinen lämpöarvon) laskenta toteutettiin kaavalla:

$$q_{v,gr,d} = q_{v,gr} * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (1)$$

missä

$q_{v,gr,d}$ on kuivan aineen kokonaislämpöarvo (J / g)

$q_{v,gr}$ on analysoidun aineen mitattu lämpöarvo (J / g)

M_{ad} on analysoidun aineen kosteusprosentti (%)

Analysoidun aineen mitattuna lämpöarvona käytettiin mittauksista saatujen tulosten keskiarvoa. Tulokset laskelmista on nähtävillä taulukosta 6.

Taulukko 6 Kokonaislämpöarvon tulokset

Näyte	Analysoidun aineen lämpöarvo KA (J / g)	Kosteusprosentti (%)	Kokonaislämpöarvo (J / g)
Pelletti	23 302	2	23 777,6

Tehollisen lämpöarvon laskenta toteutettiin kaavalla:

$$q_{p,net,d} = q_{v,gr,d} - 212,2 * \omega(H)d \quad (2)$$

missä

$q_{p,net,d}$ on Kuivan aineen tehollinen lämpöarvo (J / g)

$q_{v,gr,d}$ on Kuivan aineen kokonaislämpöarvo (J / g)

$\omega(H)d$ on Prosentuaalinen vetypitoisuus kuiva-aineen massasta (%)



Laskennassa käytettiin prosentuaalisena vetypitoisuutena (CEN/TS 16023:2013) taulukon arvoja.

Jätteen jokaisesta osasta ei ollut listattuna ennalta määritettyjä arvoja, joten vetypitoisuuden laskennallinen selvitys ei ollut mahdollista. Tämän takia päädyttiin laskenta-arvona käyttämään taulukon tuntemattoman jätteen vetypitoisuutta, joka on esitetty olevan 5%. Tulokset tehollisen lämpöarvon laskennasta on nähtävillä taulukosta 7.

Taulukko 7 Tehollinen lämpöarvon tulokset

Näyte	Kokonaislämpöarvo (J / g)	Vetypitoisuus (%)	Tehollinen lämpöarvo (J / g)	Tehollinen lämpöarvo (MJ / kg)
Pelletti	23 777,6	5	22 716,6	22,7

4. Yhteenveto

Polttokokeen ja lämpöarvon määrittämisen perusteella jäteseos osoittautui lämpöarvoltaan selvästi puuta paremmaksi. Korkeasta lämpöarvosta huolimatta jätteen polttaminen aiheuttaa merkittävästi enemmän päästöjä, erityisesti rikkidioksidin, sekä typen oksidien muodossa. Päästöjen erot on esitetty taulukossa 8, jossa vertaillaan molempien polttoaineiden arvioituja päästöjä polttokokeesta saatujen arvioiden pohjalta.

Taulukko 8 Päästöjen vertailu

Arvo	Puu	Seospelletti
NO (ppm)	34	105
SO ₂ (ppm)	0	13
NO _x (ppm)	34	110
O ₂ (%)	13	12
CO ₂ (ppm)	7	9
CO (ppm)	50	20
NO ₂ (ppm)	0	1,15

Pellettien valmistuksen yhteydessä havaittiin haasteita, jotka rajoittavat jätteen käyttöä polttoaineena seospelletin muodossa. Keskeisimmät ongelmat olivat valmiin pelletin hauraus sekä materiaalien esikäsittelyyn vaadittava energia ja laitteisto.



Pelletin hauraus johtui pääasiassa korkeasta muovipitoisuudesta. Jäte sisälsi kuiva-aineena merkittävästi muovia, mikä heikensi pelletin mekaanista kestävyyttä. Muovipitoisuuden optimoinnilla voitaisiin mahdollisesti saavuttaa puupelletin kaltainen rakenne, joka kestäisi käsittelyä ja kuljetusta.

Testiolosuhteissa esikäsittelyprosessi oli monivaiheinen ja vaati erilliset laitteistot murskaamiseen ja kuivatukseen. Korkea esikäsittelytarve heikentää seospelletin hyötyä, sillä se lisää energiankulutusta. Tämä haaste voidaan mahdollisesti ratkaista investoimalla optimoituun laitteistoon, mikä kuitenkin edellyttää toimijoilta lisäpanostuksia.



5. Lähteet

CEN/TS 16023:2013. Characterization of waste. determination of gross calorific value and calculation of net calorific value. Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 18125:2017. Solid biofuels. Determination of calorific value. Suomen standardisoimisliitto SFS.